

# **EMISSIVIDADE DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO**

Métodos de determinação e influência da  
humidade

**FRANCISCA VILAS LAGES ANHAS**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES**

---

Orientadora: Professora Doutora Eva Sofia Botelho Machado Barreira

---

Coorientadora: Professora Doutora Maria de Lurdes de Oliveira Simões

FEVEREIRO DE 2018

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2016/2017**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2016/2017 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Ao meu pai.

*Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.*

*Isaac Newton*



## **AGRADECIMENTOS**

À minha orientadora, Professora Doutora Eva Barreira, pela paciência, compreensão, apoio e disponibilidade.

À Professora Doutora Maria de Lurdes Simões, minha coorientadora, pela constante disponibilidade e incentivo.

Ao Laboratório de Física das Construções pela disponibilização do laboratório e todos os equipamentos necessários para a realização dos ensaios.

À minha Mãe por sempre acreditar e me dar asas para voar.

Ao Sebastião pela companhia diária, pelo amor, pela confiança, e, por tudo.

À minha família pela preocupação e apoio constante.

Aos meus amigos pela amizade.

Um sincero obrigada a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.



## **RESUMO**

Todas as superfícies emitem radiação. A emissividade traduz a capacidade de uma superfície emitir radiação. Quando se analisa a eficiência energética de um edifício é fundamental medir a emissividade, uma vez que está diretamente relacionada com a temperatura superficial dos materiais e com a capacidade destes emitirem mais ou menos energia.

Com o intuito de melhor conhecer o comportamento desta propriedade, é efetuada uma abordagem à emissividade, às leis relacionadas com a emissão de radiação e a alguns estudos relacionados com métodos de determinação e suas principais conclusões.

Existem vários métodos que permitem a determinação da emissividade, e, nesta dissertação, utilizando o tijolo maciço, testaram-se três métodos diferentes. Os equipamentos utilizados foram: o emissómetro, o termómetro pontual de infravermelhos e a câmara termográfica. Os resultados foram analisados e comparados com recurso a testes estatísticos, utilizando para o efeito o software SPSS.

A fim de analisar qual a influência da humidade na emissividade de vários materiais de construção, foi utilizado o emissómetro para efetuar medições de emissividade em amostras de tijolo, betão, pedra e madeira. As amostras foram submersas em água durante um longo período e, seguidamente, foi feito o acompanhamento da secagem das mesmas com a medição da respetiva emissividade e massa, até esta estabilizar.

Na comparação de métodos de determinação da emissividade, verificou-se que o termómetro pontual de infravermelhos não correspondeu às expectativas, apresentando resultados muito inferiores aos obtidos com o emissómetro e a câmara termográfica. Quanto à influência da humidade na emissividade dos materiais, concluiu-se que a humidade condiciona a emissividade, sendo que um alto teor de humidade induz a uma emissividade elevada, e que tende a estabilizar com a secagem dos materiais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Emissividade, Emissómetro, Termómetro pontual infravermelhos, Termografia, Teor de humidade





## **ABSTRACT**

All surfaces emit radiation. The emissivity translates the capacity of a surface to transmit radiation. when this one is analysed, the energetic efficiency of a building is crucial to measure the emissivity on this one and it is directly related with the superficial temperature of the materials as well as with the capacity of these to issue more or less energy.

With the purpose of getting to know better this concept, emissivity was studied in relation to the laws of the emission of radiation and to some previous studies related to the methods of its investigation and main evaluations.

There are several methods that allow an evaluation of emissivity, and therefore, in the present study, using solid brick, it was tested three different methods. The equipments used were the emissometer, the infrared spot thermometer and the thermal camera. The results were analysed and compared using the statistical software SPSS.

After analysing the effect of the humidity on the emissivity of several construction materials, the emissometer was used to measure the emissivity on solid brick, concrete, stone and wood samples. These samples were put under water for a long period of time following with the monitoring of the drying of the same alongside with the measurement of the respective emissivity and mass, until it was stabilised.

In comparison to the methods of how to determine emissivity, it was concluded that the infra red spot thermometer did not determined the expected results, exhibiting lower values when compared to the emissometer and the thermal camera. The effect of the humidity on the emissivity of the materials displayed that humidity has impact on the emissivity, subsequently the high level of humidity leads to a higher emissivity where it has the tendency to stabilize when the materials are dry.

**KEYWORDS:** Emissivity, Emissometer, Thermography, Infrared spot thermometer, Moisture content



## ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS .....	I
RESUMO .....	III
ABSTRACT .....	V
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. ENQUADRAMENTO DO TRABALHO .....	1
1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO .....	1
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO .....	2
<b>2 EMISSIVIDADE DOS MATERIAIS .....</b>	<b>3</b>
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	3
2.2. MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA EMISSIVIDADE .....	7
2.3. EMISSIVIDADE DE DIFERENTES MATERIAIS .....	13
<b>3 COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA EMISSIVIDADE .....</b>	<b>15</b>
3.1. OBJETIVOS .....	15
3.2. DESCRIÇÃO ENSAIOS .....	15
3.2.1. EQUIPAMENTOS .....	15
3.2.2. MATERIAIS .....	18
3.2.3. PROCEDIMENTOS DE ENSAIO .....	19
3.3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS .....	24
3.4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	27
<b>4 VARIAÇÃO DA EMISSIVIDADE EM FUNÇÃO DA HUMIDADE .....</b>	<b>31</b>
4.1. OBJETIVOS .....	31
4.2. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS .....	31
4.2.1. MATERIAIS .....	31
4.2.2. PROCEDIMENTO DE ENSAIO .....	33
4.3. RESULTADOS OBTIDOS .....	35

4.3.1. TIJOLO.....	35
4.3.2. BETÃO.....	37
4.3.3. PEDRA.....	39
4.3.4. MADEIRA .....	41
<b>4.4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....</b>	<b>42</b>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>45</b>
5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	45
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	47
<b>ANEXO I .....</b>	<b>49</b>
<b>ANEXO II .....</b>	<b>53</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- a) Condução; b) Radiação; c) Convecção [6].....	3
Figura 2 - Espectro da radiação eletromagnética [8].....	4
Figura 3 - Absorção, transmissão e reflexão [11] .....	6
Figura 4 - Emissividade do corpo negro, cinzento, real e espelho perfeito [9] .....	7
Figura 5 – (a) alvo de referência utilizado para a estimativa de emissividade em uma laje de mármore branca; (b) termograma adquirido na laje de mármore branca [12] .....	8
Figura 6 - Procedimento utilizado para minimizar efeitos de reflexão na utilização câmara termográfica [13].....	9
Figura 7 - Emissómetro: (1) Equilíbrio térmico; (2) Calibração; (3) Medição [13].....	9
Figura 8 - Método do material de emissividade de referência [14].....	10
Figura 9 - Método de deslizamento automatizado [15].....	10
Figura 10 - Esquema de aparelho desenvolvido para medir a emissividade [21] .....	11
Figura 11 - Procedimento automático de determinação da emissividade [22].....	12
Figura 12 - Câmara Termográfica TH9100.....	16
Figura 13 - InfReC Analyzer - Temperatura superficial da amostra.....	16
Figura 14 - Termómetro Pontual Infravermelhos.....	17
Figura 15 - Logger com três termopares tipo T.....	17
Figura 16 – Emissómetro AE1 com adaptador AE-ADP.....	18
Figura 17 - Tijolo maciço utilizado no ensaio.....	18
Figura 18 – Câmara termográfica.....	20
Figura 19 - InfRec Analyzer – Compensação da Temperatura Refletida .....	21
Figura 20 - InfRec Analyzer – Emissividade do Tijolo .....	21
Figura 21 - Ensaio com o termómetro pontual de infravermelhos.....	22
Figura 22 - Calibração do emissómetro .....	23
Figura 23 - Calibração após ajuste de temperatura e método deslizamento.....	23

Figura 24 - Comparação de métodos de determinação da emissividade .....	24
Figura 25 - Comparação de métodos de determinação da emissividade, excluindo o termómetro pontual .....	25
Figura 26 – Massa/Emissividade – Tijolo .....	25
Figura 27 - Variação da emissividade em função do ângulo de observação de não-metais [35] .....	29
Figura 28 - Amostras de Betão, Pedra, Tijolo e Madeira submersas em água .....	34
Figura 29 - Emissividade do tijolo em função das horas de secagem .....	36
Figura 30 - Emissividade do tijolo em função da massa no decorrer da secagem.....	37
Figura 31 - Emissividade do betão em função das horas de secagem .....	38
Figura 32 - Emissividade do betão em função da massa no decorrer da secagem .....	39
Figura 33 - Emissividade da pedra em função das horas de secagem .....	40
Figura 34 - Emissividade da pedra em função da massa no decorrer da secagem .....	40
Figura 35 - Emissividade da madeira em função das horas de secagem .....	42
Figura 36 - Emissividade da madeira em função da massa no decorrer da secagem .....	42

## **ÍNDICE DE TABELAS**

Tabela 1 - Emissividades de alguns materiais metais e não metais [9][24][25][26].....	14
Tabela 2 - Propriedades do tijolo [28][29][30] .....	19
Tabela 3 - Dimensões e massa inicial das amostras de tijolo.....	19
Tabela 4 - Calibração relativa dos termopares .....	22
Tabela 5 - Data realização dos ensaios.....	24
Tabela 6 - Análise estatística da comparação de métodos na determinação da emissividade.....	26
Tabela 7 – Resultados da aplicação do Teste Kolmogorov-Smirnov.....	27
Tabela 8 – Resultados da aplicação do Teste-T .....	27
Tabela 9 – Resultados de aplicação dos testes Wicoxon e Sinal.....	27
Tabela 10 - Propriedades da madeira da Criptoméria Japónica (ANEXO I) .....	31
Tabela 11 - Dimensões e massa inicial das amostras de madeira .....	32
Tabela 12 - Propriedades da pedra de Ançã (ANEXO II).....	32
Tabela 13 - Dimensões e massa inicial das amostras de pedra .....	32
Tabela 14 - Propriedade do betão [30][29][30].....	32
Tabela 15 - Dimensões e massa inicial das amostras de betão.....	33
Tabela 16 – Calendarização da realização de ensaios .....	35
Tabela 17 - Temperatura e Humidade Relativa no laboratório durante período de ensaios .....	35
Tabela 18 - Emissividade e massa das amostras de tijolo .....	36
Tabela 19 - Emissividade e massa das amostras de betão.....	38
Tabela 20 - Emissividade e massa das amostras de pedra .....	39
Tabela 21 - Emissividade e massa das amostras de madeira.....	41





## **SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS**

$\varepsilon$  – Emissividade

$\lambda$  – Condutibilidade térmica [W/(mK)]

$\rho$  – Massa volúmica [Kg/m<sup>3</sup>]

$\sigma$  - Constante de Boltzmann [5,67x10<sup>-8</sup> W/(m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>)]

$c$  – Calor específico [J/(Kg.K)]

$c$  - Velocidade da luz – 3 x 10<sup>8</sup> m/s

cm – Centímetros

$e$  – Espessura [cm]

g – Gramas

$h$  - Constante de Planck - 6, 626 x 10<sup>-34</sup> J.s

HR – Humidade relativa [%]

$k$  - Constante de Boltzmann - 1,381 x 10<sup>-23</sup> J/K

$p$  – Valor de  $p$  dos testes estatísticos [-]

$q_r^n$  - Quantidade de calor transferido por radiação [W/m<sup>2</sup>]

$T$  – Temperatura [°C ou K]



# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO DO TRABALHO

O crescimento acentuado das exigências de conforto e a necessidade imperiosa de economizar e racionalizar o uso de energia, por razões de escassez e impactes ambientais negativos, atribuem ao estudo da envolvente dos edifícios uma importância primordial.

O Homem procura condições de conforto térmico nas habitações, não só para se proteger de rigorosos invernos, como também para amenizar as condições associadas ao calor do Verão.

A emissividade é uma propriedade dos materiais que rege a transmissão de radiação e condiciona a temperatura superficial da superfície. Desta forma, tem um interesse significativo, uma vez que valores altos combinados com alta reflexão solar permitem rejeitar energia solar incidente nos edifícios, ou por outro lado, valores baixos permitem limitar as condensações, perdas de calor ou transferências de calor.

Existem na literatura valores de referência para vários tipos de materiais, mas muitas vezes não podem ser utilizados, pois não se conhecem as condições em que foram determinados, ou não correspondem às condições reais. Para um conhecimento exato e fiável do valor da emissividade devem ser obtidas medições *in situ*.

### 1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo principal deste trabalho consistiu na comparação de métodos de determinação da emissividade, assim como na análise da influência da humidade na emissividade de materiais de construção.

Para atingir estes objetivos definiu-se um conjunto de tarefas e objetivos parciais a cumprir:

- Revisão dos estudos mais relevantes sobre emissividade publicados na última década;
- Seleção dos métodos de determinação da emissividade a ensaiar;
- Seleção dos materiais de construção a ensaiar e pesquisa sobre as suas características;
- Estudo do funcionamento dos equipamentos;
- Realização dos ensaios nos materiais escolhidos para os três métodos selecionados;

- Realização de vários ensaios para cada amostra a fim de minimizar erros de medição;
- Comparação dos métodos de determinação da emissividade (emissómetro, câmara termográfica com diferentes ângulos de observação e termómetro pontual de infravermelhos);
- Análise e comparação dos resultados obtidos pelos diferentes métodos;
- Comparação dos resultados obtidos com valores presentes na literatura;
- Análise da influência da humidade dos materiais na emissividade dos mesmos.

### **1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO**

Este trabalho está dividido em cinco capítulos:

O Capítulo 1 enquadra, resume os objetivos e define a estrutura do trabalho.

O Capítulo 2 descreve a emissividade como propriedade fundamental dos materiais de construção, faz um resumo de estudos encontrados na literatura sobre esta propriedade e descreve os métodos de determinação da mesma.

O Capítulo 3, de carácter experimental, apresenta os equipamentos utilizados na medição da emissividade, assim como os procedimentos laboratoriais adotados. São apresentados e discutidos os resultados obtidos, através de uma análise estatística a fim de comparar os métodos testados.

O Capítulo 4, também de carácter experimental, descreve os ensaios realizados com vista a analisar a influência da humidade na emissividade dos vários materiais. São apresentadas sob a forma gráfica as relações entre o tempo de secagem, a emissividade e a respetiva massa.

O Capítulo 5 apresenta as principais conclusões deste estudo e possíveis desenvolvimentos futuros.

## 2

## EMISSIVIDADE DOS MATERIAIS

## 2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O coeficiente de transmissão térmica da envolvente de um edifício é um dos parâmetros fundamentais a ter em conta na fase de projeto, pois devido aos novos regulamentos no domínio da poupança de energia foram criadas normas relativas ao desempenho energético dos edifícios. Muitas vezes, o desempenho previsto dos elementos de construção não corresponde ao valor real, resultando uma sobrestimação do desempenho do edifício. Na ausência de dados fiáveis sobre as características da envolvente, o valor das perdas deve ser medido *in situ*, tendo em consideração as condições reais de utilização. O envelhecimento dos materiais, as condições de utilização, a poluição, a exposição à humidade e aos gradientes de temperatura afetam a condutibilidade térmica dos elementos de construção ao longo dos anos [1][2][3].

O calor é uma forma de energia que pode ser transferida de um sistema para outro, devido a uma diferença de temperaturas [4]. A transferência é sempre efetuada do sistema com a temperatura mais elevada para o sistema de temperatura mais baixa, e para quando é atingido o equilíbrio entre os sistemas [5].

Existem três métodos de transferência de calor, a condução, a radiação e a convecção (Figura 1).

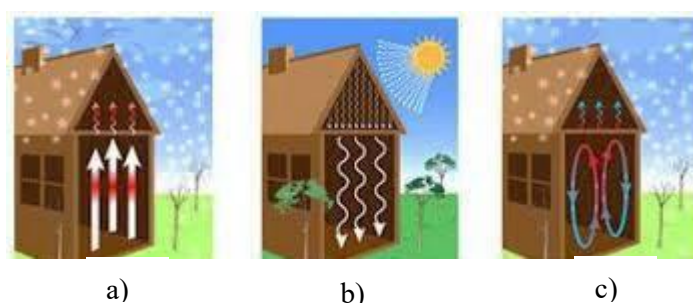


Figura 1- a) Condução; b) Radiação; c) Convecção [6]

A transferência de calor por condução é efetuada ao nível molecular, isto é, as partículas mais energéticas, associadas ao sistema com temperatura mais elevada, transferem parte da sua energia por contacto com as partículas contíguas menos energéticas, sistema com temperatura inferior. Pode ocorrer em gases, líquidos ou sólidos. A condutibilidade térmica de um material é uma propriedade física que

quantifica a capacidade dos materiais conduzirem energia térmica, logo, na transferência de calor por condução é fundamental conhecer esta propriedade. Quanto mais baixa for a condutibilidade térmica do material, maior resistência este oferece, e diz-se, nesse caso, ser um isolante. Caso contrário, sendo a condutibilidade térmica elevada, o material terá uma menor resistência e designa-se bom condutor. A transferência de calor por condução depende ainda das diferenças de temperatura existentes entre as duas faces de um elemento e da sua área e espessura [5].

A convecção é um modo de transferência de energia entre uma superfície sólida e um líquido ou gás adjacente que está em movimento, com diferentes temperaturas. A geometria da superfície, a natureza e as propriedades do fluido, e principalmente a velocidade e o movimento, influenciam a energia transferida por convecção [5].

Ao contrário dos restantes métodos, a transferência de calor por radiação não necessita de um meio físico para ocorrer. É o único meio de transmissão de calor que pode ocorrer no vácuo. A radiação térmica é a energia emitida por todos os corpos com uma temperatura acima do zero absoluto sob a forma de radiações eletromagnéticas na gama de comprimentos de onda 0.1 a 100 µm do espectro eletromagnético, com uma intensidade que é função da temperatura absoluta a que se encontram e do estado da sua superfície. Quanto maior a temperatura de um objeto, maior é a quantidade de calor que este irradia. Resulta da emissão e propagação de ondas eletromagnéticas por alteração na configuração eletrónica de átomos e moléculas [4][5][7].

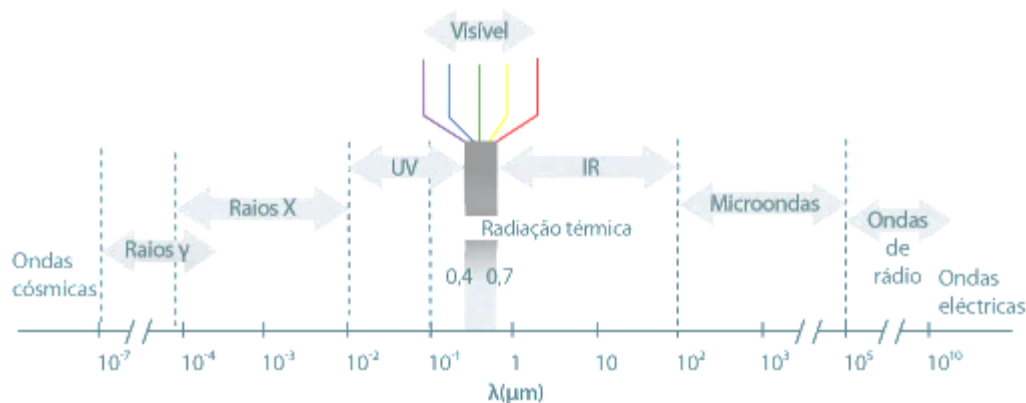


Figura 2 - Espectro da radiação eletromagnética [8]

A energia radiante máxima que um corpo emite é dada pela Lei de Stefan-Boltzmann (2.1), e, apenas uma superfície teórica a emite, o chamado corpo negro. O corpo negro absorve toda a radiação nele incidente, não reflete ou transmite, e emite, para qualquer comprimento de onda e em todas as direções, a máxima radiação possível para a temperatura de um corpo. Há duas maneiras de criar um corpo negro: estabelecendo uma cavidade praticamente fechada no sólido ou utilizando um absorvente perfeito, através de tratamentos e pinturas superficiais. Nenhum outro corpo a uma dada temperatura, num determinado comprimento de onda, pode emitir mais radiação que um corpo negro.

$$q_r^n = \sigma \times T^4 \quad (2.1)$$

Há várias leis que regem a emissão de radiação de um corpo negro. A Lei de Kirchhoff diz que o corpo negro é capaz de emitir radiação para todos os comprimentos de onda, cedendo energia à sua envolvente até estabelecido o equilíbrio termodinâmico. Da Lei de Planck (2.2) resulta a radiação emitida pelo corpo negro relacionando a temperatura com o comprimento de onda. A Lei de Wien (2.3), derivada da lei anterior, traduz o deslocamento do máximo valor da radiância espectral em função da temperatura. E a Lei de Stefan-Boltzmann (2.1), referida anteriormente, permite obter o valor da energia radiante de um corpo negro para uma determinada temperatura [4][9][10].

$$\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2 \cdot \lambda^{-5}}{\exp \frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T} - 1} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (2.2)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} \quad [\mu\text{m}] \quad (2.3)$$

$\lambda$  - Comprimento de onda (m)

T - Temperatura do corpo negro (Kelvin)

h - Constante de Planck -  $6,626 \times 10^{-34}$  J.s

c - Velocidade da luz -  $3 \times 10^8$  m/s

k - Constante de Boltzmann -  $1,381 \times 10^{-23}$  J/K

De uma maneira geral, os corpos não são negros e as leis anteriores têm de ser adaptadas aos corpos reais, tendo em consideração determinadas correções. Os materiais correntes apresentam um poder radiante inferior ao do corpo negro (para a mesma temperatura e comprimento de onda). Chama-se emissividade à propriedade que traduz a relação entre a energia efetivamente emitida pelo corpo real e a energia emitida pelo corpo negro à mesma temperatura [7].

Num corpo real apenas uma porção da parcela da radiação que nele incide é absorvida ( $\alpha$ ), sendo a restante refletida ( $\rho$ ) ou transmitida ( $\tau$ ), como mostra a Figura 3. As três parcelas dependem do comprimento de onda, e para um dado comprimento de onda a soma das três é sempre igual à unidade:

$$\alpha(\lambda) + \tau(\lambda) + \rho(\lambda) = 1 \quad (2.4)$$

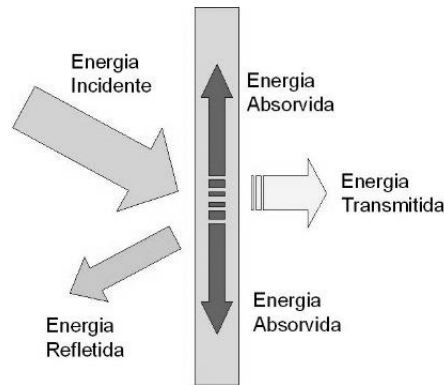


Figura 3 - Absorção, transmissão e reflexão [11]

Segundo a Lei de Kirchoff, para qualquer material a uma determinada temperatura e um dado comprimento de onda a emissividade e a absorção espectrais da superfície são iguais, isto é:

$$\alpha(\lambda) = \varepsilon(\lambda) \quad (2.5)$$

Substituindo na expressão (2.4), fica definida da seguinte forma:

$$\varepsilon(\lambda) + \tau(\lambda) + \rho(\lambda) = 1 \quad (2.6)$$

A emissividade determina a maior ou menor quantidade de energia que um corpo emite. Quanto menor a emissividade do corpo, menor será a energia emitida, e, maior será a temperatura superficial do elemento. Quando se fala de eficiência energética de um edifício é fundamental salientar esta propriedade, uma vez que está diretamente relacionada com a temperatura superficial dos materiais e com a capacidade de emitir mais ou menos energia. Depende de vários fatores, como o comprimento de onda, a direção de observação em relação à superfície em estudo e a temperatura da superfície. O valor da emissividade é adimensional e varia entre 0 e 1, e nos materiais de construção correntes apresenta valores elevados.

Um corpo negro é um perfeito emissor para a radiação na região visível e infravermelha e é um perfeito absorvente independentemente do comprimento de onda, tendo como característica  $\varepsilon = \alpha = 1$ . Existem ainda os corpos cinzentos, também estes corpos teóricos, em que a emissividade é constante para todos os comprimentos de onda. A Figura 4 mostra a variação da emissividade em função do comprimento de onda para vários casos. Os corpos não cinzentos são os corpos reais cuja emissividade varia com o comprimento de onda, existindo reflexão, transmissão e absorção de radiação infravermelha [5][9][10].





Figura 4 - Emissividade do corpo negro, cinzento, real e espelho perfeito [9]

A Lei de Stefan-Boltzmann adaptada para um corpo real, fica definida da seguinte forma:

$$q_r^n = \epsilon \times \sigma \times T^4 \quad (2.7)$$

onde  $\sigma$  é a constante de Stephan-Boltzmann e tem o valor de  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ,  $q_r^n$  é a quantidade de calor transferido por radiação, por unidade de área, em  $\text{W}/\text{m}^2$ ,  $T$  é a temperatura em Kelvin e  $\epsilon$  é a emissividade [5].

## 2.2. MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA EMISSIVIDADE

Ciocia e Marinetti (2012), com o intuito de utilizar a termografia infravermelha como método de diagnóstico para o património edificado, descrevem um método de determinação de emissividade *in situ*. A termografia de infravermelhos é uma técnica de diagnóstico não destrutiva, utilizada para avaliar o desempenho dos edifícios. Para os autores, o conceito de diagnóstico do desempenho refere-se à avaliação geral da performance do edifício e para tal surge a necessidade de avaliar as propriedades físicas dos materiais envolvidos. A medição de temperatura através da termografia infravermelhas exige o conhecimento da emissividade da superfície e da temperatura refletida. Neste sentido, os autores descrevem um método de determinação de emissividade de fácil execução. O método descrito divide-se em duas etapas. A primeira, é baseada no conhecimento de valores de emissividade de referência avaliados em laboratório, e a segunda, consiste na medição da emissividade *in situ* sob condições de ambiente controladas.

Em laboratório através de duas câmaras distintas com bandas espectrais diferentes, testam valores de referência para cada uma, comparando a emissividade de uma folha branca e uma folha preta, para um intervalo de confiança de 85%. Na segunda etapa, isto é, na medição de emissividade *in situ*, há três pressupostos a ter em conta, nomeadamente, as emissividades de referência corresponderem à câmara utilizada no teste, a temperatura refletida ser a mesma para as referências e o alvo e que se mantenha constante ao longo do teste e as referências e o alvo terem a mesma temperatura durante o teste. A Figura 5 (a) ilustra as referências utilizadas e a mármore branca como alvo e a Figura 5 (b) o exemplo de um termograma a ser utilizado no processo de determinação da emissividade.

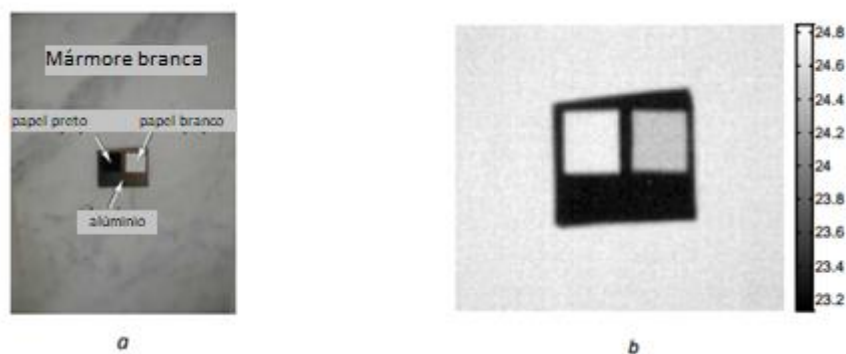


Figura 5 – (a) alvo de referência utilizado para a estimativa de emissividade em uma laje de mármore branca; (b) termograma adquirido na laje de mármore branca [12]

Após as medições concluiu-se que existem materiais que têm alta emissividade em ambos os espectros, como a mármore branca, enquanto outros, como o acabamento de madeira e placas de gesso, devem ser caracterizados em cada gama IV [12].

E. Barreira, E. Bauer, N. Mustelier, V. P. Freitas (2015) descrevem dois métodos de determinação da emissividade e comparam os resultados obtidos. O primeiro método descrito, utiliza a câmara termográfica e uma fita preta de emissividade conhecida, e o segundo, utiliza um emissómetro.

No primeiro método mencionado é colocada na amostra uma fita preta de emissividade conhecida e as amostras são aquecidas num forno a 70°C durante 24h. Para minimizar os efeitos de reflexão foi utilizada uma caixa de cartão para colocação das amostras no momento em que são efetuados os termogramas, como é possível observar na Figura 6. Através de um software próprio e considerando a emissividade da fita preta igual a 0,90, é definida a emissividade da amostra por um ajuste de temperaturas entre o padrão de referência, a fita preta e a amostra. Foi ainda determinada a emissividade da amostra considerando a emissividade da fita preta igual a 0,95, baseado na literatura, a fim de avaliar a influência na emissividade da amostra. O segundo método consiste na medição da emissividade das amostras através de um emissómetro e seguindo a norma ASTM C1371 – 04a. Este método de ensaio consiste na utilização de uma pilha termoelétrica diferencial para a determinação da emissividade hemisférica. O equipamento contém dois padrões de referência para a calibração do mesmo, um de alta e um de baixa emissividade. Os padrões são colocados em cima do dissipador de calor e após o equilíbrio térmico ser atingido, é efetuada a calibração e medida a emissividade diretamente na amostra com base na comparação da amostra com os padrões (Figura 7).

Após os ensaios e comparação dos resultados concluíram que a determinação da emissividade através da câmara termográfica utilizando o método da fita preta é fiável e os resultados são semelhantes aos obtidos através do emissómetro, à exceção dos materiais metálicos que tem grande poder de reflexão. É também destacado a importância do uso da correta emissividade da fita preta, pois caso contrário os valores da emissividade obtidos pela câmara termográfica são diferentes dos reais [13].



Figura 6 - Procedimento utilizado para minimizar efeitos de reflexão na utilização câmara termográfica [13]

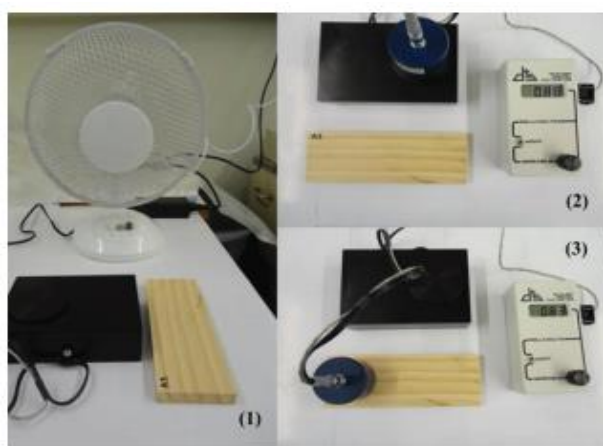


Figura 7 - Emissómetro: (1) Equilíbrio térmico; (2) Calibração; (3) Medição [13]

Usamentiaga et al. descreve a termografia como um método importante na determinação de temperaturas superficiais e como sendo um teste não destrutivo. Perante a necessidade de determinação da emissividade para a obtenção da temperatura real, descreve um método de determinação da mesma. Salienta a importância da medição precisa para materiais com baixa emissividade, pois são mais sensíveis a alterações de temperatura quando comparados com os materiais com altas emissividades. O procedimento utilizado é baseado na obtenção da temperatura de referência através de termopares ou, para temperaturas baixas, a utilização do método da fita preta de emissividade conhecida e o dispositivo infravermelho. Nomeia o método em que utiliza os termopares de método de contacto, e o segundo, de método de material de emissividade de referência (Figura 8). Uma vez conhecida a temperatura real do material, a amostra é medida novamente com o dispositivo infravermelho, na superfície da amostra, e a configuração da emissividade é ajustada até que a temperatura seja igual à temperatura real medida inicialmente. Como conclusão considera a termografia por infravermelhos uma tecnologia rápida, limpa e segura com uma ampla variedade de aplicações, mas com algumas melhorias a ser propostas no futuro a fim de melhorar a deteção, simplificar a interpretação de resultados e reduzir a interferência [14].

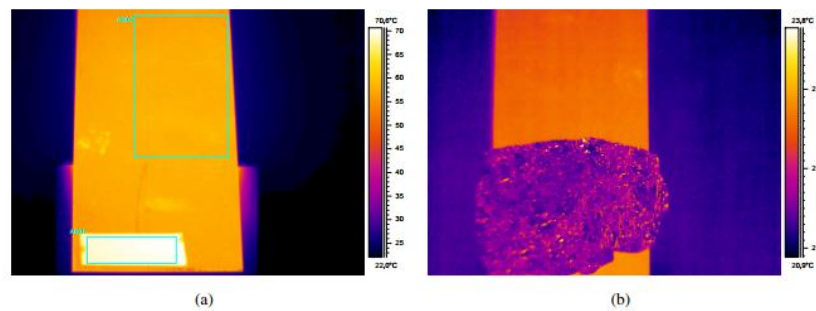


Figura 8 - Método do material de emissividade de referência [14]

Muscio et al., propõe uma abordagem automatizada da utilização do emissómetro no método do deslizamento. Afirmam que apenas dois métodos estão disponíveis para medição da emissividade, quer em laboratório, quer *in situ*, o método descrito na norma ASTM 1371 [16] e na norma EN 15976 [17]. O método mais utilizado na determinação desta propriedade é o descrito pela norma ASTM 1371 Standard, que correlaciona a emissividade com o fluxo de calor radiativo entre a superfície da amostra, mantida a temperatura ambiente, e o emissómetro quente. Os autores apenas referem um equipamento como compatível com esta norma, da Devices & Services AE/RD1 Emissometer, que mede a emissividade total hemisférica do material. Caso haja uma baixa condutibilidade térmica do material, o produtor do emissómetro sugere uma modificação à norma, optando pelo método do deslizamento, no qual o detetor quente é deslizado por cima da amostra a fim de evitar o aquecimento da mesma. Este movimento é realizado manualmente, sendo a medição demorada e pode ser afetada pelo operador, caso não cumpra todas as calibrações necessárias e não siga os tempos estipulados para o deslizamento. Com o intuito de resolver estes problemas, os autores propõem uma abordagem automatizada, em que o detetor é movido por um braço robotizado, que gere tanto o movimento do adaptador, como a calibração com os padrões de referência (Figura 9), que sintonizado com um sistema de aquisição de dados monitoriza a saída no emissómetro.



Figura 9 - Método de deslizamento automatizado [15]

Foram comparados os valores obtidos através do método do deslizamento efetuado manualmente e com a implementação robótica e os resultados foram semelhantes [15].

A. Moropoulou utiliza dois métodos para a determinação da emissividade, o primeiro de acordo com a norma ASTM E1933-97, e o segundo de acordo com procedimentos empíricos. No primeiro ensaio o objetivo é testar a emissividade para duas temperaturas diferentes. As amostras foram colocadas numa câmara climática, até atingir as temperaturas pretendidas, quando confirmadas por um termómetro sem contacto, a câmara infravermelha foi ajustada para determinar os valores de emissividade. No segundo ensaio apenas queria testar os materiais para uma temperatura e recorreu a uma fita elétrica, de emissividade conhecida, para determinar a emissividade dos materiais. Cada amostra foi medida 10 vezes e foi também utilizado um termómetro sem contacto para confirmar a temperatura pretendida. O procedimento é similar ao anterior, aquecer as amostras e com a câmara termográfica ajustada obtêm-se o valor da emissividade. Várias conclusões foram retiradas deste estudo, como a dependência da emissividade com a textura, a microestrutura e principalmente, com a temperatura. Foi também observado que a humidade absorvida através do material, muda a textura da superfície e, indiretamente, surgem alterações de cor induzidas a partir dos diferentes níveis de humidade [18].

Tadeu et al, descrevem a determinação da emissividade em ligas com memória de forma (materiais metálicos que têm a capacidade de, depois de sujeitos a deformações, voltar ao seu estado inicial) e o seu comportamento durante a transformação de fase e como pode influenciar a temperatura da liga. A medição é feita através de um aparelho experimental desenvolvido para este fim (Figura 10), construído de acordo com o JIS A1423 [19] e ASTM E1933-99 [20].

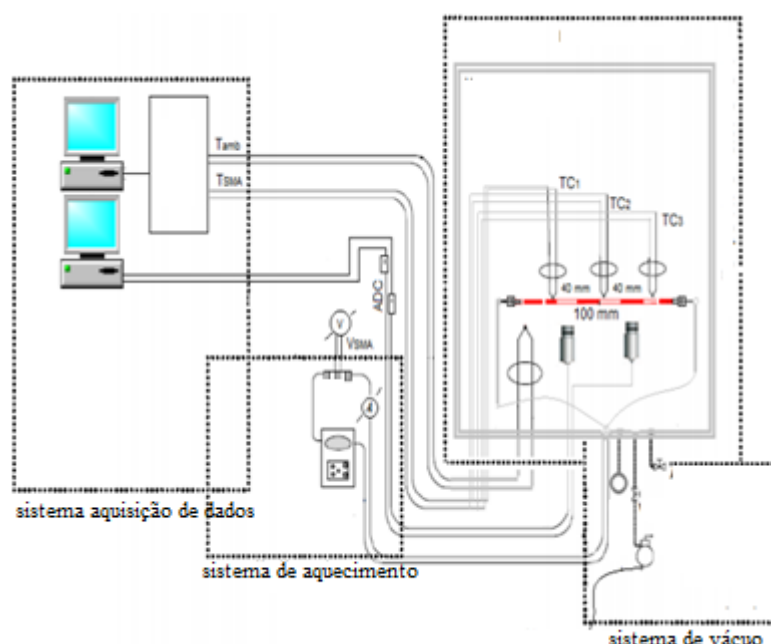


Figura 10 - Esquema de aparelho desenvolvido para medir a emissividade [21]

Este aparelho realiza as medições através de meios calorimétricos e radiométricos diretos ou indiretos para temperaturas que variam de 25°C a 100°C e para comprimentos de onda entre 8 e 14  $\mu\text{m}$  sob vácuo. Para medir a emissividade hemisférica total, o equipamento usa uma fonte ativa e um detetor de infravermelho conectado ao bloco de controle através de cabos de fibra ótica. A configuração permite ainda a obtenção do ângulo de dependência de emissividade em relação à sua inclinação. Chegaram à conclusão que a emissividade hemisférica média global mostrou variações em torno de 9% entre estados martensíticos e totalmente austeníticos [21].

Piotr Skibisz e Piotr Micek apresentaram um método baseado no uso iterativo de um sistema automático de medição e controle de temperatura, recorrendo a termopares e pirómetros, para fornecer características dependentes da temperatura do objeto em estudo. O método apresentado consiste em determinar a temperatura real do corpo com auxílio de termopares, de seguida, com o pirómetro, é determinada a temperatura do corpo, e, fazendo constantes ajustes na emissividade, ao atingir a temperatura real, medida pelos termopares, obtemos o valor da emissividade do material. Foi proposto para este último passo uma forma de o automatizar, sugerindo um sistema clássico de controle de feedback atrasado. Dada a temperatura superficial através do termopar, a temperatura medida pelo pirómetro é considerada como uma variável controlada, com base na diferença de temperatura o manipulador define a quantidade de controle (Figura 11). À medida que o coeficiente de emissividade causa diminuição da temperatura no pirómetro, a inversão do sinal no valor de entrada e feedback é feita, e por fim para a determinação do coeficiente de emissividade é utilizada uma versão diferencial de um algoritmo digital proporcional mais integral. O uso de uma abordagem iterativa permite estimar o coeficiente de emissividade em ampla gama de temperaturas, no entanto um aumento no número de iterações poderia alongar este intervalo [22].

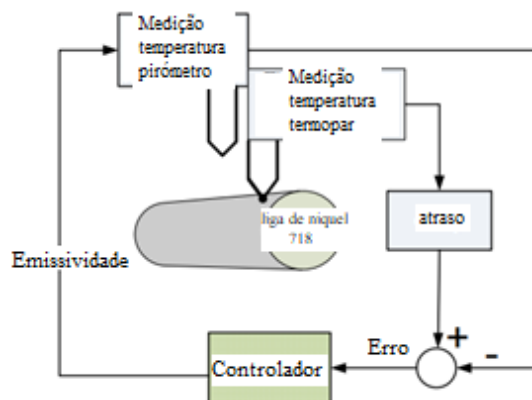


Figura 11 - Procedimento automático de determinação da emissividade [22]

Małgorzata O'Grady et al, utilizam a câmara de infravermelhos para a determinação das temperaturas superficiais e abordam também o facto da importância do valor da emissividade ser medida *in situ* e não obtida através da literatura, pois fatores como a idade, poluição e humidade, afetam esta propriedade. Para configurar a emissividade, foi seguido o padrão ISO 18434, utilizando o método de contacto. Com a câmara é medida a temperatura do objeto, através de termogramas, de seguida utilizando um termopar é medida novamente a temperatura do objeto no mesmo sítio considerado no termograma. Sem mover a câmara nem o objeto, a emissividade deste, é ajustada até que a temperatura medida na câmara seja igual à apresentada pelo termopar [23].

Albatici et al, usaram um emissómetro técnico de termovisão infravermelha para determinação a emissividade. Um método de avaliação direta por meio de ITT (Infrared Thermovision Technique) usando um equipamento portátil, que oferece um procedimento rápido, bastante preciso. Os resultados dos ensaios foram promissores levando à possibilidade de aplicar o método no local, conseguindo deste modo analisar a situação real dos materiais, tendo em conta a poluição, envelhecimento e modo de colocação dos mesmos [2].

### **2.3. EMISSIVIDADE DE DIFERENTES MATERIAIS**

Para a utilização dos valores tabelados torna-se fundamental verificar as condições de medição, nomeadamente as temperaturas de ensaio, o acabamento da superfície do material, o ângulo de medição e o comprimento de onda adotado. Todos estes fatores influenciam a emissividade de um material.

Na literatura encontramos valores tabelados, Tabela 1, para vários materiais de construção, mas como já foi referido, se for possível, o ideal será realizar uma avaliação *in situ*, com os meios necessários, pois com o tempo as propriedades dos materiais vão-se deteriorando e a emissividade poderá ser afetada.



Tabela 1- Emissividades de alguns materiais metais e não metais [9][24][25][26]

<b>Material</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Emissividade (ε)</b>	
<i>Aço com ferrugem</i>	20	0.69	<b>Metais</b>
<i>Aço muito oxidado</i>	50	0.88	
<i>Aço não oxidado, polido</i>	100	0.07-0.08	
<i>Alumínio, superfície rugosa</i>	20-50	0.06-0.07	
<i>Cobre polido</i>	21-100	0.02-0.03	
<i>Cobre rugoso</i>	38	0.74	
<i>Ferro enferrujado</i>	20-25	0.61-0.85	
<i>Ferro galvanizado, brilhante</i>	-	0.13	
<i>Ferro não oxidado, polido</i>	100	0.05-0.07	
<i>Ferro oxidado</i>	100	0.64-0.74	
<i>Água</i>	38	0.67	<b>Não metais</b>
<i>Alcatrão</i>	-	0.79-0.84	
<i>Alvenaria de pedra</i>	38	0.93	
<i>Areia</i>	20	0.60-0.76	
<i>Betão</i>	0-100	0.92-0.94	
<i>Betão castanho</i>	-	0.83-0.87	
<i>Betão cinzento</i>	-	0.62-0.63	
<i>Cimento</i>	-	0.54	
<i>Gelo</i>	0	0.96-0.97	
<i>Granito</i>	21	0.45	
<i>Gravilha</i>	38	0.28	
<i>Madeira</i>	-	0.80-0.90	
<i>Madeira, carvalho</i>	38	0.91	
<i>Mármore branca</i>	38	0.95	
<i>Mármore cinzenta, polida</i>	20-22	0.93	
<i>Papel branco</i>	20	0.70-0.95	
<i>Papel preto mate</i>	-	0.94	
<i>Pedra calcária</i>	38	0.95	
<i>Reboco</i>	-	0.91	
<i>Solo argiloso</i>	20	0.66	
<i>Solo, arado</i>	20	0.38	
<i>Tijolo refratário</i>	20	0.85	
<i>Tijolo vermelho</i>	20-21	0.88-0.93	
<i>Vidro</i>	0-100	0.91-0.94	



# 3

## COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA EMISSIVIDADE

### 3.1. OBJETIVOS

Como descrito anteriormente verificou-se a existência de vários métodos de determinação da emissividade. O presente capítulo aborda a aplicabilidade de alguns desses métodos, apresentando os equipamentos utilizados e o respetivo procedimento. O material utilizado para a comparação de métodos foi o tijolo maciço, cujas características também serão descritas neste capítulo. Utilizando a medição direta e hemisférica do emissómetro, e a medição por ajuste no termómetro pontual e na câmara termográfica, é efetuada uma análise estatística dos resultados obtidos, assim como uma comparação entre métodos e destes com os valores expectáveis presentes na literatura. Serão também apresentadas as vantagens e desvantagens de cada um.

### 3.2. DESCRIÇÃO ENSAIOS

#### 3.2.1. EQUIPAMENTOS

O primeiro ensaio realizado consistiu na utilização da câmara termográfica. A câmara utilizada foi a *Thermo Tracer TH9100 MR da NEC Avio Infrared Technologies Co., Ltd* (Figura 12), com uma faixa de medição entre os -20°C e os 100°C, uma precisão  $\pm 2^\circ\text{C}$  ou  $\pm 2\%$  e resolução de 0,06 a 30°C. Esta câmara deteta a energia infravermelha emitida pelo objeto, convertendo-a em sinal elétrico e produzindo imagens térmicas, dando-nos a conhecer as temperaturas na superfície de toda a amostra (Figura 13). O método utilizado na determinação da emissividade foi o “método da fita preta”, método que consiste na utilização de uma fita preta de emissividade conhecida, 0,88, colada à amostra durante o processo de captura das imagens térmicas (Figura 13), e, através de um método iterativo no programa de análise de imagens, *InfReC Analyzer NS9500 Lite Program*, é determinada a emissividade do material.



Figura 12 - Câmara Termográfica TH9100

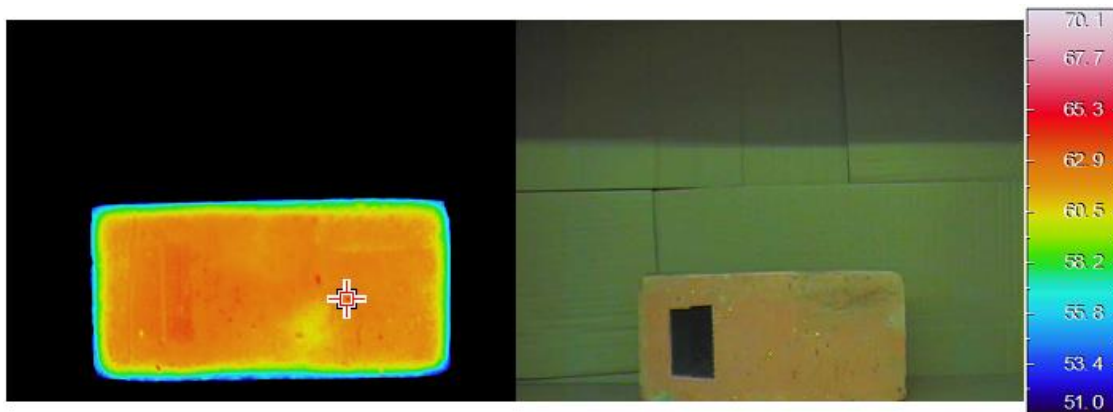


Figura 13 - InfReC Analyzer - Temperatura superficial da amostra

De seguida, realizou-se a medição da temperatura superficial através de um termómetro pontual de infravermelhos, em que o equipamento utilizado foi o *Infrared Radiation Pyrometer IE7 da Impac Eletronic GmbH* (Figura 14). Este é um pirómetro de mão que mede a temperatura à superfície, não necessitando de contacto directo com a amostra. Uma das suas características principais é a possibilidade de alterar a emissividade no decorrer da medição da temperatura, permitindo um constante ajuste. Tem uma faixa de medição entre os  $-20^{\circ}\text{C}$  e os  $1300^{\circ}\text{C}$ , uma precisão de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  ou  $\pm 0,5\%$  e resolução de  $1^{\circ}\text{C}/0,1^{\circ}\text{C AVC}$ . Para a medição da temperatura superficial da amostra foram utilizados termopares do tipo T (cobre constantan) ligados a um equipamento de aquisição de dados da *TECHNETICS* (Figura 15).



Figura 14 - Termómetro Pontual Infravermelhos



Figura 15 - Logger com três termopares tipo T

Para finalizar, efetuou-se a medição direta da emissividade do material utilizando o emissómetro. O equipamento utilizado foi o *Emissómetro da Devices & Services Company*, modelo AE1 (Figura 16). Este equipamento é próprio para a medição da emissividade em superfícies plana, com boa condutividade térmica (razão  $\lambda/x$  maior do que  $1100 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ , onde  $\lambda$  é a condutibilidade térmica e  $x$  é a espessura do material) e segue a norma ASTM C1371, “Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature. Using Portable Emissometers” [16]. A medição é feita por comparação de padrões de alta e baixa emissividade com valores conhecidos e exige que estes se encontrem à mesma temperatura que a superfície em estudo. A precisão dos padrões fornecidos é da ordem dos  $\pm 0,02$ .

Em todos os ensaios foi utilizado o adaptador modelo padrão AE-ADP, indicado para a medição da emissividade em amostras de menor tamanho, materiais com baixa condutibilidade térmica ( $\lambda/e$  inferior a  $1100 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ), superfícies cilíndricas de grande raio, superfícies rugosas e com textura. A utilização de adaptadores melhora a precisão dos ensaios em  $\pm 0,005$ . Por uma questão de uniformização dos resultados obtidos foi utilizado o adaptador em todos os ensaios (Figura 16).

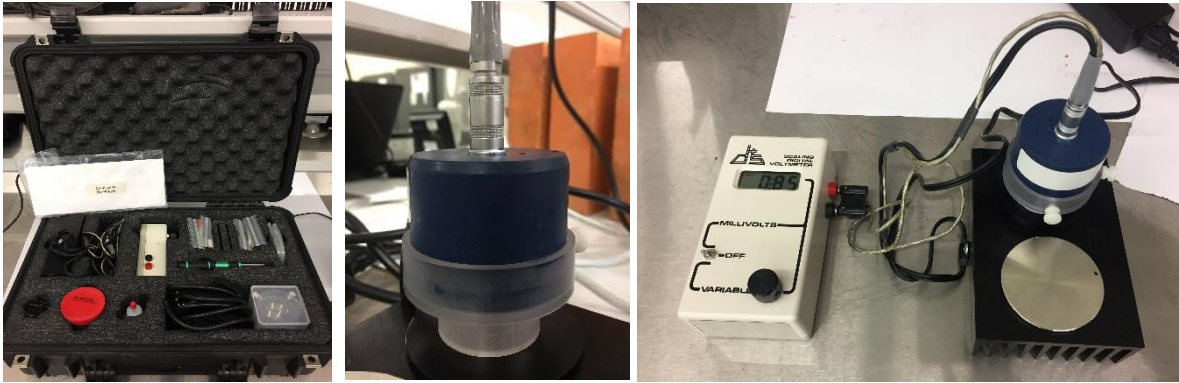


Figura 16 – Emissómetro AE1 com adaptador AE-ADP

Na realização dos ensaios, foi também utilizada uma *Balança Swiss Quality Precisa 5000D-12000G*, para a determinação da massa dos provetes ao longo do processo de secagem. As amostras consideraram-se secas quando a variação de massa era inferior a 0.1% em pesagens intercaladas de 24h [27]. A secagem das amostras foi efetuada numa estufa *WTC Binder*.

### 3.2.2. MATERIAIS

O material utilizado para a realização dos ensaios foi o tijolo maciço (Figura 17), estando as suas principais características descritas na Tabela 2, tais como: massa volúmica,  $\rho$  (Kg/m<sup>3</sup>); a condutibilidade térmica,  $\lambda$  (W/(m.K)); o calor específico,  $c$  (J/(Kg.K)); e a emissividade. Foram utilizadas 10 amostras semelhantes, cuja massa e dimensões são apresentadas na Tabela 3.

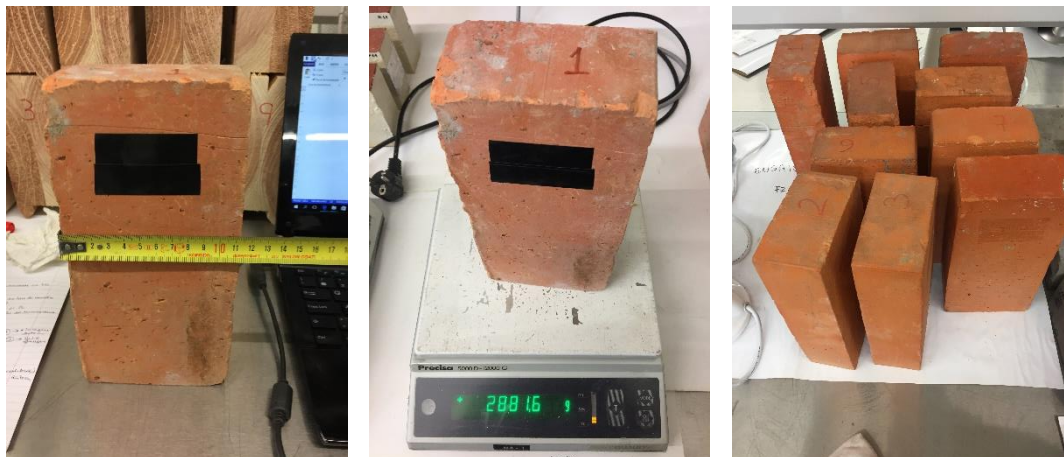


Figura 17 - Tijolo maciço utilizado no ensaio

Tabela 2 - Propriedades do tijolo [28][29][30]

	$\rho$ Kg/m <sup>3</sup>	$\lambda$ W/(m.K)	$c$ J/(Kg.K)	$\epsilon$ (literatura)
Tijolo maciço	1800	0,69	920	0,88-0,93

Tabela 3 - Dimensões e massa inicial das amostras de tijolo

Amostras	Dimensões (cm)	Massa tijolo seco (g)
1	11,5 x 23,0 x 6,0	2860,7
2	11,3 x 22,9 x 6,0	2848,8
3	11,3 x 22,7 x 6,0	2874,7
4	11,3 x 22,7 x 6,0	2838,2
5	11,4 x 22,7 x 5,9	2836,9
6	11,2 x 22,4 x 6,0	2831,2
7	11,4 x 23,0 x 6,0	2862,3
8	11,4 x 23,0 x 6,0	2883,0
9	11,2 x 22,7 x 6,2	2906,7
10	11,3 x 22,7 x 5,9	2875,7

### 3.2.3. PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Na primeira fase do procedimento de ensaio foram pesadas e medidas as 10 amostras de tijolo e foi colocada a fita preta, *Scotch® Super 33+™ Vinyl Electrical Tape*, para posterior utilização no ensaio da termografia (Figura 17). De seguida, as amostras foram colocadas em estufa a 70°C até verificarem o critério de paragem (variação de massa inferior a 0.1% em pesagens intercaladas de 24h). Verificando-se a estabilização da massa, começou-se o ciclo de ensaios.

Para avaliar a emissividade normal dos materiais utilizando a câmara termográfica, o procedimento consistiu no seguinte [31]:

1. Aquecer as amostras numa estufa a 70 °C durante 24 horas.
2. Ligar a câmara com a tampa colocada e esperar 10 minutos para o aquecimento da mesma.
3. Efetuar a calibração da câmara:
  - a. Calibração da Reflexão: consiste na compensação da radiação infravermelha proveniente do ambiente onde se realiza o ensaio, com recurso a um procedimento semiautomático. Esta calibração é realizada sempre que se inicia a câmara, 10 minutos após a câmara ter sido ligada, com a tampa de proteção da lente, considerando a emissividade do fundo igual a 1,0. Pressiona-se o comando REF CAL e a máquina efetua a própria calibração de reflexão.
  - b. Compensação da Temperatura Refletida: consiste em compensar a reflexão da superfície em estudo da radiação emitida pelas superfícies vizinhas. Para esta calibração utiliza-se uma folha de alumínio, amarrotada, alisada e fixada no fundo da caixa de cartão utilizada para minimizar os efeitos de reflexão (Figura 12). Posiciona-se a câmara perpendicularmente à folha de alumínio e efetua-se um termograma abrangendo toda a

área, usando emissividade igual a 1,0. Só se realiza este procedimento no início do ensaio. Com o programa de tratamento das imagens térmicas, seleciona-se no termograma da folha de alumínio uma área e a temperatura média dessa área (Figura 19) será a temperatura refletida na amostra durante os restantes ensaios, que se coloca no campo *Ambient Temp* (Figura 19).



Figura 18 – Câmara termográfica

4. As amostras foram removidas da estufa e colocadas na caixa de cartão na posição pretendida ( $45^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $135^\circ$ ). A fita colada sobre uma porção da superfície serve de referência pois tem emissividade conhecida. De seguida, captam-se as imagens térmicas.
5. No tratamento das imagens começa-se por colocar a emissividade da fita preta e verificar a temperatura da mesma, criando para o efeito uma seleção de área em cima desta, com a finalidade do valor final obtido ser uma média das temperaturas e não um ponto em específico (Figura 20 – Retângulo A). Considerando uma área similar à definida na fita preta, mas agora na amostra de tijolo, por tentativas varia-se a emissividade tentando aproximar a temperatura média da amostra à temperatura média da área na fita preta. A emissividade que mais aproximar a temperatura será a emissividade do material (Figura 20 – Retângulo B, C e D).



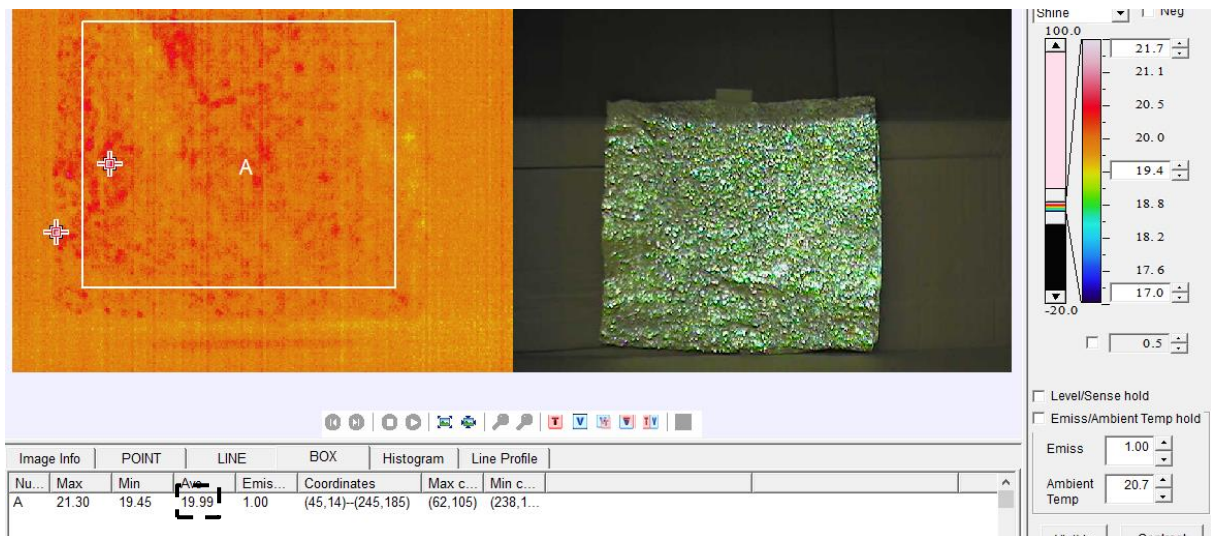


Figura 19 - InfRec Analyzer – Compensação da Temperatura Refletida

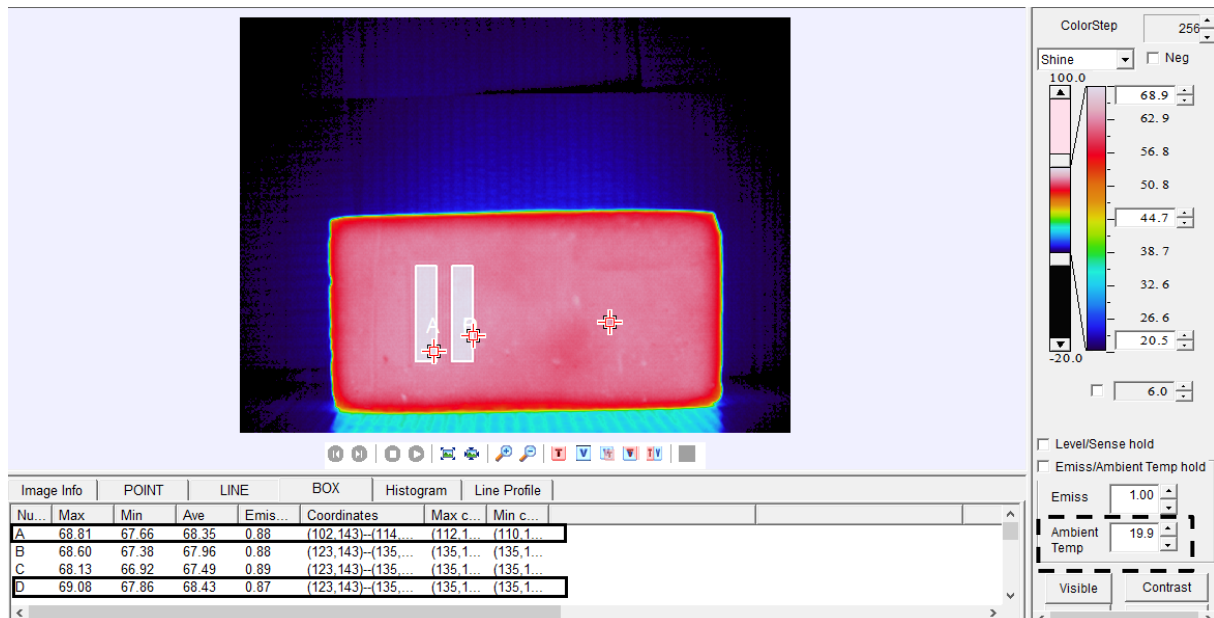


Figura 20 - InfRec Analyzer – Emissividade do Tijolo

Concluída a medição da emissividade utilizando a câmara termográfica, deixaram-se arrefecer as amostras à temperatura ambiente, durante aproximadamente 3 dias (Tabela 5). De seguida efetuaram-se os ensaios com o termómetro pontual de infravermelhos. Para obtermos a temperatura da amostra colocaram-se três termopares, ligados a um equipamento de aquisição de dados, colados à amostra. A calibração relativa dos três termopares foi realizada durante 1 dia, com registos de 1 em 1 minuto, verificando-se que a variação entre eles não era significativa (Tabela 4). De seguida, recorrendo ao termómetro pontual de infravermelhos e apontando perpendicularmente à amostra (Figura 21), foi-se ajustando a emissividade para que o valor medido no equipamento fosse igual à temperatura medida pelos termopares [32]. Quando atingida a temperatura registada pelos termopares no termómetro pontual de infravermelhos o valor da emissividade lido seria o valor associado à amostra.

Tabela 4 - Calibração relativa dos termopares

	Termopar 1	Termopar 2	Termopar 3
<b>Mínimo</b>	20,1	20,2	20,1
<b>Máximo</b>	22,4	22,8	22,8
<b>Desvio padrão</b>	0,495	0,496	0,469
<b>Média</b>	20,73	20,85	20,73

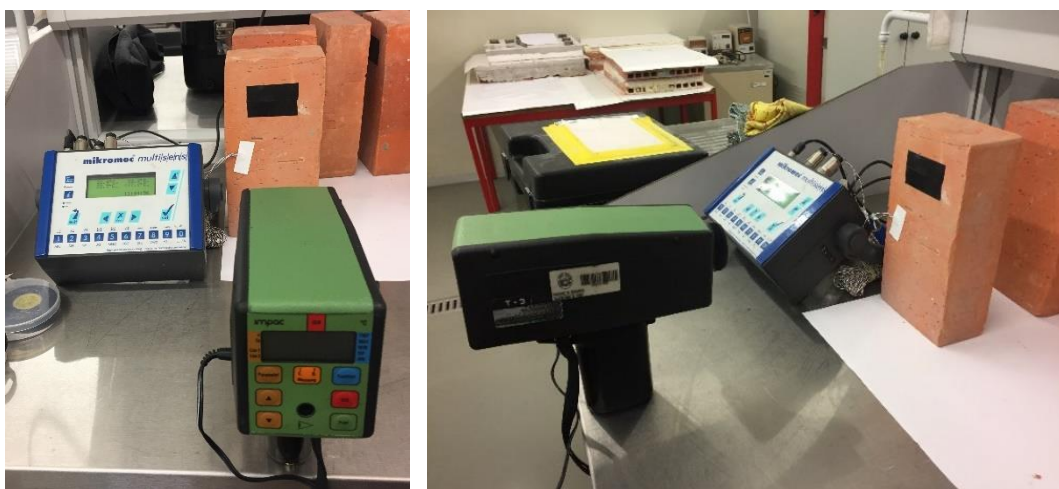


Figura 21 - Ensaio com o termómetro pontual de infravermelhos

Por fim, foi efetuada a determinação da emissividade utilizando o emissómetro com as amostras à temperatura ambiente.

Para materiais cuja razão entre a condutibilidade térmica e a espessura ( $\lambda/e$ ) é inferior a  $1100\text{W/m}^2\cdot\text{K}$  não se pode aplicar o procedimento referido na norma ASTM C1371, logo para o tijolo teremos de utilizar um método diferente, isto é, o método do deslizamento. Como referido anteriormente foi utilizado para todos os ensaios o adaptador AE-ADP para minimizar o erro e uniformizar os resultados. O procedimento adotado foi o seguinte [33]:

1. Ligar o emissómetro à ficha com o adaptador colocado e deixar o equipamento aquecer durante 30 minutos.
2. Efetuar a calibração (Figura 23):
  - a. Colocar o detetor com o adaptador em cima do padrão de referência de alta emissividade e fixar durante, pelo menos, 90 segundos para a leitura estabilizar;
  - b. Ajustar o “variable gain knob” do voltímetro para que a leitura corresponda ao valor correto da emissividade do padrão de referência, 0.88;
  - c. Colocar o detetor em cima do padrão de referência de baixa emissividade e fixar durante, pelo menos, 90 segundos para a leitura estabilizar;
  - d. Ajustar com a chave-de-fendas, no “voltmeter offset” para que a leitura corresponda ao valor correto da emissividade do padrão de referência, 0.05;



- e. Repetir os passos a) a e) até que o detetor, ao ser mudado de um padrão para o outro não necessite de ajuste.
3. Colocar o detetor com o adaptador a alguma distância do dissipador de calor e da amostra e usar uma ventoinha para igualar as temperaturas da amostra e do dissipador de calor (Figura 23);
4. Desligar a ventoinha, após 5 minutos, e colocar o detetor com adaptador em cima do padrão de referência de emissividade alta, durante 1 minuto, até estabilizar a leitura.
5. Ajustar no voltímetro de modo que o visor mostre a emissividade do padrão de referência, ou seja, 0.88 (Figura 23).
6. Segurar o detetor com adaptador, sobre um ponto da amostra durante 20 segundos, até a leitura estabilizar (Figura 23).
7. Mover o emissómetro para outro ponto da amostra e, após 15 segundos, voltar a mover para outro ponto da amostra. Repetir este passo até, na totalidade, já ter passado um minuto. Ter sempre o cuidado de não quebrar o contato entre superfícies. A leitura máxima obtida no último ponto corresponde ao valor da medição da emissividade da amostra.

Repetir os pontos 3 a 7 para todas as amostras.



Figura 22 - Calibração do emissómetro



Figura 23 - Calibração após ajuste de temperatura e método deslizamento

Foram realizados três ciclos de medições para cada método, incluindo cada ciclo a medição das 10 amostras. Na Tabela 5 estão apresentadas as datas da realização dos ensaios.

Tabela 5 - Data realização dos ensaios

	Câmara Termográfica	Termómetro Pontual Infravermelhos	Emissómetro
03-03-2017	Ciclo 1		
	Ciclo 2		
	Ciclo 3		
*06-03-2017	Ciclo 1		
	Ciclo 2		
07-03-2017		Ciclo 3	Ciclo 1
08-03-2017	Ciclo 2		
	Ciclo 3		

\*3 dias correspondentes ao arrefecimento das amostras a fim de garantir equilíbrio com a temperatura ambiente

### 3.3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

O gráfico da Figura 24 apresenta uma comparação dos resultados obtidos para os três métodos de determinação da emissividade.

Verificamos uma grande discrepância entre os resultados obtidos pelo emissómetro e pela câmara termográfica comparativamente ao termómetro pontual de infravermelhos. Enquanto os primeiros rondam valores entre 0.84 – 0.92 os últimos variam entre 0.67 – 0.80.

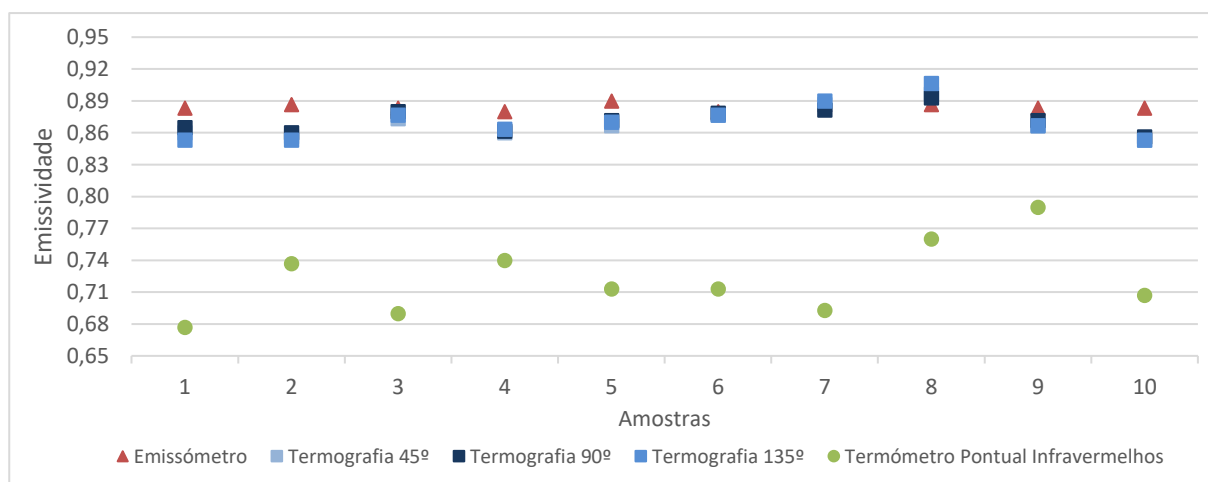


Figura 24 - Comparação de métodos de determinação da emissividade

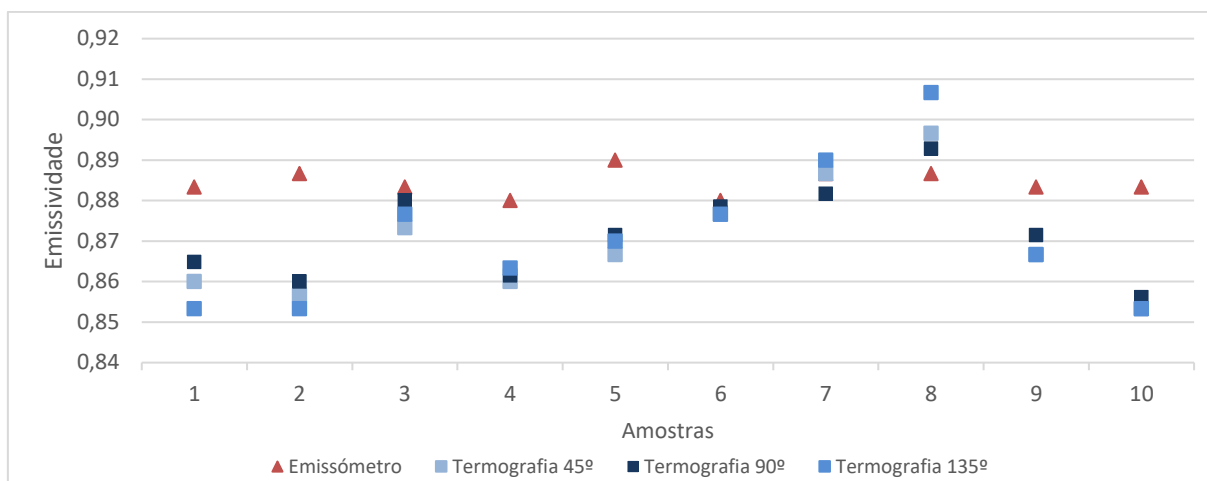


Figura 25 - Comparação de métodos de determinação da emissividade, excluindo o termómetro pontual

No gráfico da Figura 25 excluímos o termómetro pontual de infravermelhos, devido aos valores baixos apresentados, para ter uma melhor perceção da variação entre os restantes métodos. Com o emissómetro os valores variam entre 0,88 e 0,89, já a termografia apresenta um intervalo mais alargado, com valores a variar entre 0,85 e 0,91. Em cada amostra os valores da termografia apesar de terem sido efetuados de diferentes ângulos são próximos entre eles, havendo algumas amostras que apresentaram mesmo valores iguais para os três ângulos testados.

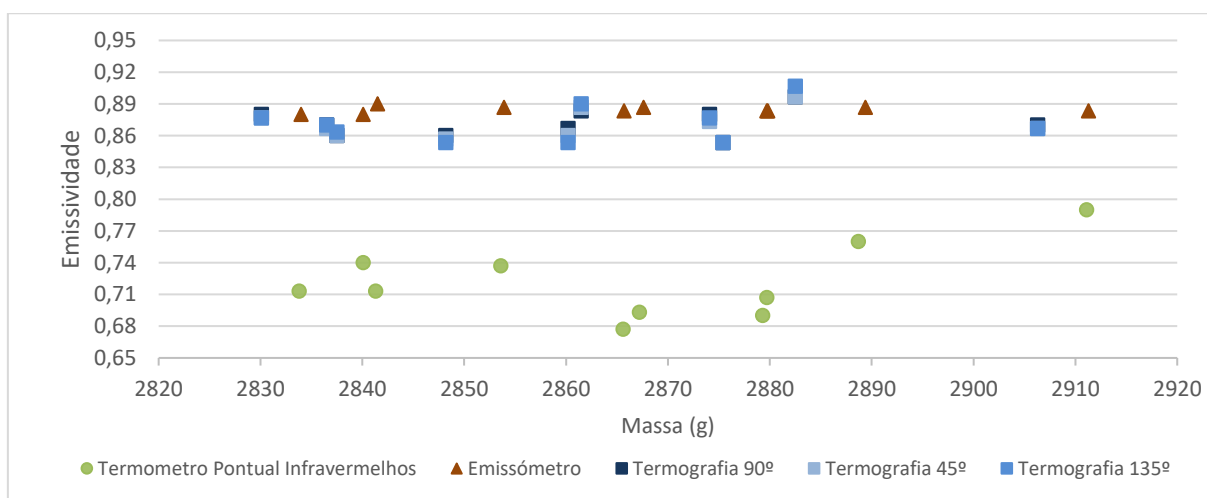


Figura 26 – Massa/Emissividade – Tijolo

O gráfico da Figura 26 relaciona a emissividade com a massa da respetiva amostra, para os diferentes métodos testados. De uma forma geral, chegamos a um resultado bastante disperso e aparentemente sem qualquer ligação entre as duas variáveis analisadas: massa e emissividade.

É notório que o termómetro pontual de infravermelhos apresenta valores muito abaixo do esperado, deste modo para a análise estatística dos resultados estes não foram considerados.

Na análise estatística foi utilizado o *Software SPSS - Statistical Package for Social Sciences*, onde foi efetuada uma análise descritiva que incluiu medidas de localização central (média e mediana), medidas de dispersão (desvio padrão) e outras medidas (o coeficiente de assimetria, o mínimo e o máximo) (Tabela 6). Foram aplicados vários testes estatísticos, nomeadamente testes não paramétricos, o teste Kolmogorov-Smirnov, o teste de Wilcoxon e o teste do Sinal para duas amostras emparelhadas e também o teste paramétrico teste-T [34].

O Teste de Kolmogorov-Smirnov é um teste não paramétrico sobre a igualdade de distribuições de probabilidade, usado para comparar uma amostra com uma distribuição de probabilidade de referência, neste caso foi obtido sob a hipótese de que a emissividade do tijolo seguiria uma distribuição Normal. Nesse sentido, surge a necessidade de certificarmos se essa suposição pode ser assumida (Tabela 7). Em que  $H_0$ : variável segue distribuição Normal;  $H_1$ : variável não segue uma distribuição Normal. Rejeita-se a normalidade da distribuição se o valor-p, for inferior ou igual ao nível de significância, fixado em  $\alpha=0.05$ , ou aceita-se se o valor-p for superior ao nível de significância.

O teste-T é um teste de hipóteses que usa conceitos estatísticos para rejeitar ou não uma hipótese nula quando a estatística do teste segue uma distribuição Normal. O teste-T aplicado mede se a média de dois grupos é significativamente diferente.

O teste de Wilcoxon é um teste não paramétrico, utilizado para comparar duas amostras relacionadas, emparelhadas ou medições repetidas numa única amostra para avaliar as diferenças entre as médias das variáveis. Sendo  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , a amostra aleatória com distribuição contínua e simétrica e com média (e mediana)  $\mu$ , determinam-se as diferenças  $X_i - \mu$ ,  $i=1,2,\dots,n$  e classificam-se as diferenças absolutas  $|X_i - \mu|$  por ordem ascendente e atribuem-se aos níveis os sinais correspondentes. Sendo  $p^+$  a soma dos níveis positivos e  $p^-$  o valor absoluto da soma dos níveis negativos,  $p = \min(p^+, p^-)$  (Tabela 9).

O teste do Sinal é um método estatístico para determinar diferenças consistentes entre pares de observação, é um teste baseado na diferença das medianas,  $\mu_D$ . Em que:  $H_0: \mu_D = 0$ ;  $H_1: \mu_D \neq 0$ . Rejeitando  $H_0$  para valores inferiores ao nível de significância, ou aceitando  $H_0$  para valores superiores ao nível de significância (Tabela 9).

O teste de Wilcoxon e o teste de Sinal são semelhantes, embora o primeiro seja mais forte, devido à maior sensibilidade para determinar diferenças que o segundo [34].

Em toda a análise estatística efetuada foi fixado um nível de significância de 5%.

Tabela 6 - Análise estatística da comparação de métodos na determinação da emissividade

	Temperatura laboratório	HR laboratório	Emissómetro	Termografia 90°	Termografia 135°	Termografia 45°
Média	21,127	62,132	0,884	0,872	0,871	0,870
Mediana	21,009	62,839	0,885	0,875	0,870	0,870
Desvio Padrão	0,170	1,017	0,007	0,014	0,018	0,014
Assimetria	0,745	-0,745	-0,327	0,297	0,760	0,598
Erro padrão da assimetria	0,427	0,427	0,427	0,427	0,427	0,427
Mínimo	21,009	60,718	0,870	0,850	0,850	0,850
Máximo	21,364	62,839	0,900	0,900	0,910	0,900

Tabela 7 – Resultados da aplicação do Teste Kolmogorov-Smirnov

		Emissómetro	Termografia 90°	Termografia 135°	Termografia 45°
Parâmetros normais	Média	0,8843	0,8720	0,8710	0,8697
	Desvio Padrão	0,00728	0,01375	0,01768	0,01426
Diferenças Mais Extremas	Absoluto	0,282	0,242	0,166	0,191
	Positivo	0,224	0,242	0,166	0,191
	Negativo	-0,282	-0,220	-0,118	-0,116
Estatística do teste		0,282	0,242	0,166	0,191
valor de p		,000	,000	,033	,007

Tabela 8 – Resultados da aplicação do Teste-T

	Média	Desvio Padrão	95% Intervalo de Confiança da Diferença		t	p
			Inferior	Superior		
Emissómetro – Termografia 90°	0,012	0,015	0,007	0,018	4,570	0,000
Termografia 90° – Termografia 135°	0,001	0,008	-0,002	0,004	0,648	0,522
Termografia 90° – Termografia 45°	0,002	0,005	0,000	0,004	2,536	0,017
Termografia 135° – Termografia 45°	0,001	0,006	-0,001	0,004	1,161	0,255

Tabela 9 – Resultados de aplicação dos testes Wilcoxon e Sinal

	Wilcoxon	Sinal
	p	p
Termografia 90° - Emissómetro	0,000	0,001
Termografia 90° - Termografia 135°	<b>0,617</b>	<b>1,000</b>
Termografia 45° - Termografia 90°	0,020	0,039
Termografia 45° - Termografia 135°	<b>0,248</b>	<b>0,180</b>

### 3.4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Analisando a Figura 24 e Figura 25, chegamos à conclusão que entre os três equipamentos utilizados para a medição da emissividade, nomeadamente a câmara termográfica, o termómetro pontual de

infravermelhos e o emissómetro, o segundo apresentou resultados bastante diferentes dos esperados. Valores muito inferiores aos obtidos pelos outros dois métodos, assim como muito inferiores quando comparados com os valores apresentados na literatura para a emissividade do tijolo maciço. Há vários fatores que podem condicionar os resultados, como a temperatura do tijolo, as condições climáticas do laboratório que variavam diariamente, a condicionante das amostras de tijolo apresentarem uma camada exterior com algumas irregularidades e algumas marcas de má conservação, aliando ainda o facto de o termómetro pontual de infravermelhos apenas medir num ponto específico da amostra e não uma área, como acontece com os restantes métodos. Entre o emissómetro e a câmara termográfica, o primeiro, apesar de ser um método moroso e que obriga a bastante exigência nas calibrações e durante a medição, foi o método mais eficaz quando comparado com os valores presentes na literatura, e também, o método que apresenta menores variações de resultados entre as amostras. Quanto à termografia, apesar de ser realizada *in situ* e permitir uma visualização instantânea das diferenças de temperatura em vários pontos do objeto, para a determinação da emissividade é necessária uma análise posterior no software do equipamento, o que para este objetivo torna o processo também complexo, além de apresentar maior variação de resultados entre amostras do que o emissómetro.

Com recurso às análises estatísticas efetuadas, Tabela 6, verificamos que a emissividade média obtida pelos ensaios realizados com o emissómetro está, como esperado, dentro do intervalo que a literatura assume como sendo a emissividade do tijolo maciço, 0,88-0,92. No entanto, com a termografia, para os três ângulos ensaiados, a emissividade média ronda os 0,87, ligeiramente inferior ao intervalo anteriormente referido, contudo, as médias da emissividade medida pelos diferentes ângulos são semelhantes entre si. Na Tabela 7, com aplicação do teste K-S, concluímos que as emissividades obtidas pelos métodos testados não seguem uma distribuição Normal, pois o valor-p foi inferior ao nível de significância assumido, 5% em todos os casos. Na Tabela 8 são apresentados os resultados do Teste-T, apesar de no teste anterior concluirmos que não seguiam uma distribuição Normal, foi aplicado e considerado tendo em conta que a amostra é de dimensão suficiente para tal. O resultado mostra que os valores apresentados pelo emissómetro e pela Termografia a 90° não apresentam semelhanças entre si, assim como a Termografia a 45° e a 90°. Já na comparação dos ângulos de 90° e 135°, e também 45° e 135°, o teste-T apresentou um valor de p que nos indica existir semelhança relevante na emissividade obtida nestes ângulos de observação. Na Tabela 9, com o teste Wicoxon e o teste do Sinal, foram confirmados os resultados obtidos no teste anterior, isto é, foram também comparados em pares os vários métodos realizados, concluindo, novamente, que a Termografia a 90° e o emissómetro não tem semelhança nos resultados obtidos, assim como a Termografia a 45° e a 90°. Quando comparadas a Termografia a 90° e a 135° e a Termografia a 45° e a 135° o teste volta a dar positivo para uma semelhança entre ambos os pares de ângulos, sendo mais acentuada no primeiro caso. Resultado esperado na comparação da termografia a 90° com o emissómetro, mas diferente do esperado na comparação entre a emissividade medida pelos diferentes ângulos de observação. De acordo com a Figura 27, a emissividade do tijolo, entre os ângulos de observação analisados, 45°, 90° e 135°, não deveria alterar quando variado o ângulo de captação dos termogramas, isto é, deveria apresentar semelhanças nos testes aplicados para todos os casos de comparação de ângulos. Tal facto não se verifica em um dos casos, nomeadamente na comparação do ângulo de 45° e 90°. Por outro lado, observando o gráfico da Figura 25, verificamos que a emissividade medida pela câmara termográfica nas diferentes variantes estudadas, apesar de entre amostras variar claramente, dentro da mesma amostra os três ângulos analisados apresentam sempre valores muito próximos. Podemos justificar a não semelhança quando aplicados os testes, mas, aparentemente, a proximidade dos valores quando analisados graficamente, com o rigor excessivo dos testes estatísticos aplicados.

Há sempre alguns fatores a ter em conta quando à fiabilidade dos resultados durante as medições com a câmara termográfica, como as reflexões dos objetos e superfícies envolventes, a posição do manipulador

quando efetuados os termogramas e a temperatura das amostras que varia constantemente, pois para a termografia, o tijolo saía diretamente da estufa a 70°C e a temperatura ambiente média era de 21°C. A precisão dos equipamentos é um fator a ter em conta para todos os métodos.

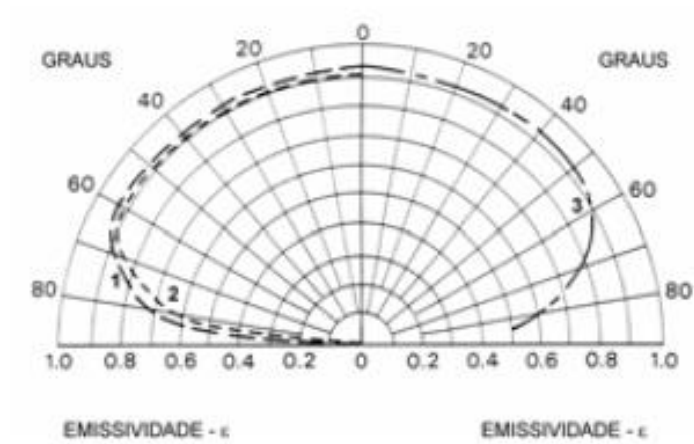


Figura 27 - Variação da emissividade em função do ângulo de observação de não-metais [35]





## 4

## VARIAÇÃO DA EMISSIVIDADE EM FUNÇÃO DA HUMIDADE

### 4.1. OBJETIVOS

A humidade é um dos principais fatores que influencia a emissividade de um corpo. Neste capítulo é analisada a variação da emissividade, com auxílio de um emissómetro, ao longo da secagem de vários materiais de construção, após a sua embebição em água. Os materiais utilizados foram tijolos maciços, blocos de betão, pedra de Ançã e madeira da Criptoméria.

### 4.2. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

#### 4.2.1. MATERIAIS

Os materiais utilizados no estudo de variação da emissividade em função da humidade foram o tijolo maciço, a madeira, a pedra e o betão, cujas propriedades principais, como massa volúmica,  $\rho$  ( $\text{Kg/m}^3$ ), a condutibilidade térmica,  $\lambda$  ( $\text{W/(m.K)}$ ), o calor específico,  $c$  ( $\text{J/(Kg.K)}$ ) e a emissividade estão apresentados nas Tabela 2, Tabela 10, Tabela 12 e Tabela 14, respetivamente. Para o tijolo, a madeira e o betão foram utilizadas 10 amostras de cada material, enquanto que para a pedra apenas foi possível testar 9 amostras. As dimensões e massas iniciais de cada uma das amostras estudadas são apresentadas nas Tabela 3, Tabela 11, Tabela 13 e Tabela 15.

Tabela 10 - Propriedades da madeira da Criptoméria Japónica (ANEXO I)

	$\rho$ $\text{Kg/m}^3$	$\lambda$ $\text{W/(m.K)}$	$c$ $\text{J/(Kg.K)}$	$\varepsilon$ (literatura)
Madeira Criptoméria Japónica	287	0.0747	-	-

Tabela 11 - Dimensões e massa inicial das amostras de madeira

Amostras	Dimensões (cm)	Massa inicial (g)
1	16,9 x 30,1 x 8	1087.85
2	16,8 x 30,1 x 8	1010.66
3	16,8 x 30,1 x 8	1054.18
4	16,9 x 30,1 x 8	1027.89
5	16,7 x 30,1 x 8	1048.96
6	16,8 x 30,1 x 8	1068.00
7	16,7 x 30,1 x 8	1068.19
8	16,8 x 30,1 x 8	1087.81
9	16,8 x 30,1 x 8	1106.36
10	16,8 x 30,1 x 8	1079.28

Tabela 12 - Propriedades da pedra de Ançã (ANEXO II)

	$\rho$ Kg/m <sup>3</sup>	$\lambda$ W/(m.K)	$c$ J/(Kg.K)	$\epsilon$ (literatura)
Pedra de Ançã	2155	1,33	1000	-

Tabela 13 - Dimensões e massa inicial das amostras de pedra

Amostras	Dimensões (cm)	Massa inicial (g)
1	15,0 x 15,0 x 2,0	990.64
2	14,9 x 14,9 x 2,0	957.78
3	14,9 x 15,0 x 2,0	971.32
4	15,0 x 15,0 x 2,0	977.60
5	14,7 x 15,0 x 2,0	958.74
6	15,0 x 15,0 x 2,2	990.00
7	14,9 x 15,0 x 2,1	966.37
8	15,0 x 15,0 x 2,0	982.12
9	15,0 x 15,0 x 2,0	980.85

Tabela 14 - Propriedade do betão [30][29][30]

	$\rho$ Kg/m <sup>3</sup>	$\lambda$ W/(m.K)	$c$ J/(Kg.K)	$\epsilon$ (literatura)
Betão	2204*	1,65	940	0,92

\*Medidos de acordo com a norma EN12390-7

Tabela 15 - Dimensões e massa inicial das amostras de betão

Amostras	Dimensões (cm)	Massa inicial (g)
1	15,0 x 15,0 x 7,4	3857.0
2	15,0 x 15,3 x 7,3	3864.6
3	15,0 x 15,1 x 7,8	4011.7
4	15,2 x 15,0 x 7,1	3724.9
5	15,0 x 15,0 x 7,4	3839.3
6	15,0 x 15,0 x 7,5	3889.0
7	15,0 x 15,0 x 7,5	3975.2
8	15,0 x 15,0 x 7,2	3739.2
9	15,0 x 15,1 x 7,4	3910.4
10	15,0 x 14,9 x 7,0	3782.0

#### 4.2.2. PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Para a determinação da influência da humidade na emissividade dos materiais começou-se por numerar, pesar e medir todas as amostras de todos os materiais. De seguida através do método descrito em 3.2.3, com o emissómetro da *Devices & Services Company*, modelo AE1, foram realizadas medições de emissividade em todas as amostras, à temperatura ambiente. Foram realizados três ciclos de medições para cada material, em que cada ciclo contempla as 10 amostras.

As amostras foram embebidas em água (Figura 28) e assim permaneceram até a variação da massa ser inferior a 0,1% em pesagens com 24 horas de intervalo. Para o tijolo, a pedra e o betão, passados 6, 5 e 13 dias, respetivamente, verificou-se a estabilização da massa. No caso da madeira não foi possível obter a estabilização da massa, devido ao tempo disponível para ensaios ser reduzido, assim o processo foi interrompido passados 23 dias da colocação em água, momento em que a média de variação de massa diária era de 0,7%.

Para medição da massa e verificação do critério de paragem, as amostras foram retiradas da água, deixando escorrer a água superficial durante 1 minuto, e, de seguida, foi efetuada a pesagem, comparando com a pesagem das 24 horas anteriores.

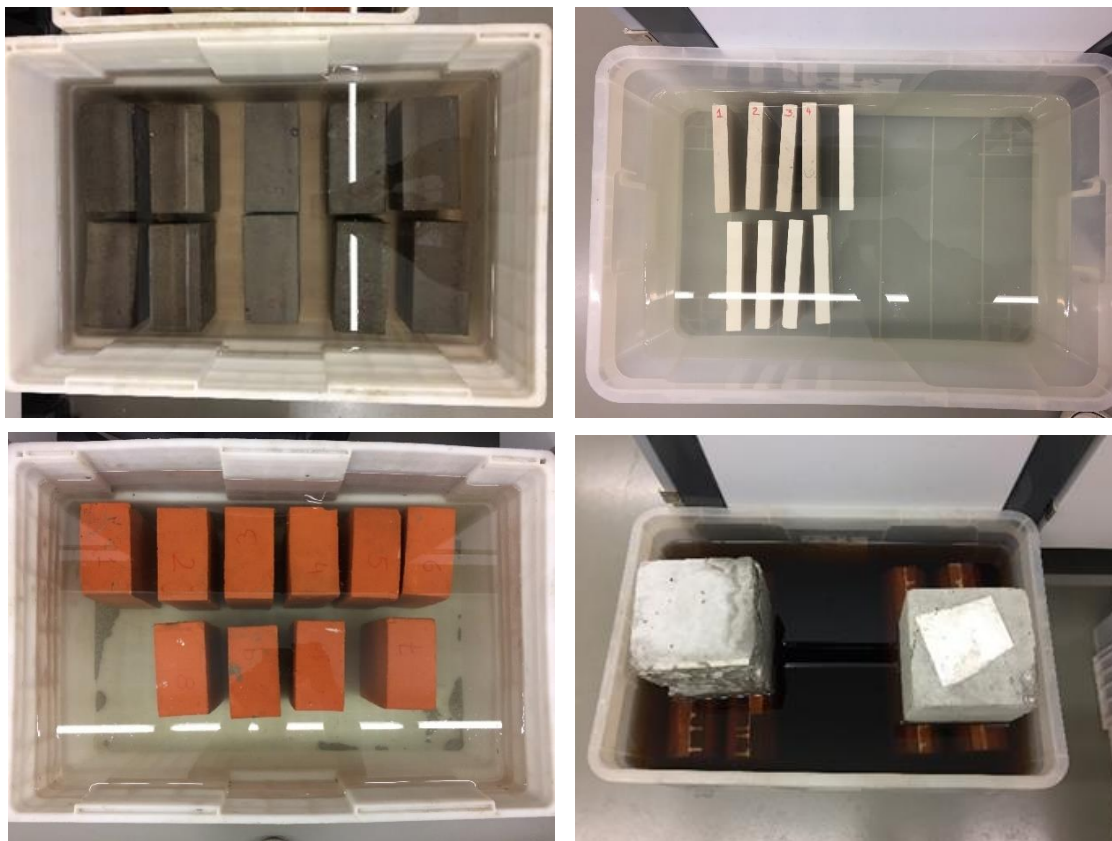


Figura 28 - Amostras de Betão, Pedra, Tijolo e Madeira submersas em água

Assim que o critério era verificado para todas as amostras de cada um dos materiais analisados, efetuou-se a primeira medição de emissividade pelo método descrito anteriormente em 3.2.3, em cada uma das amostras do material, sempre pela mesma ordem, e colocou-se num local seco, todas na mesma posição, a fim de uniformizar a secagem. Antes de cada medição de emissividade as amostras foram pesadas.

Para todos os materiais foram realizados 3 ciclos de medições no dia em que as amostras foram retiradas da água, 2 ciclos no dia seguinte e 1 ciclo no terceiro dia, nas restantes semanas foi realizado no mínimo 1 ciclo por semana. Foram efetuadas medições de emissividade até a massa da amostra estabilizar, a fim de cumprir uma variação inferior a 0,1% em pesagens intercaladas de 24 horas, com a exceção novamente da madeira, em que foram interrompidas as medições devido à lenta secagem do material, com a variação média de massa de 1% relativamente ao dia anterior, mas com os valores de emissividade já estabilizados. Na Tabela 16 estão apresentadas as datas de realização dos ensaios. A temperatura e humidade relativa do laboratório durante todo período de acompanhamento de secagem das amostras foram registados e são apresentados de forma sucinta na Tabela 17. A temperatura varia entre os 19,7°C e os 24,6°C, enquanto a humidade relativa varia entre os 22,2% e os 60,5%.

Tabela 16 – Calendarização da realização de ensaios

Data	Tijolo maciço	Betão	Pedra	Madeira
20 Março	3 ciclos			
21 Março	2 ciclos			
22 Março	1 ciclo			
23 Março	1 ciclo			
24 Março	1 ciclo			
28 Março	1 ciclo			
29 Março		3 ciclos	3 ciclos	
30 Março		2 ciclos	2 ciclos	
31 Março		1 ciclo	1 ciclo	
4 Abril	1 ciclo	1 ciclo	1 ciclo	
5 Abril				3 ciclos
6 Abril	1 ciclo	1 ciclo	1 ciclo	2 ciclos
7 Abril				1 ciclo
11 Abril				1 ciclo
13 Abril	1 ciclo	1 ciclo	1 ciclo	1 ciclo
20 Abril	1 ciclo	1 ciclo	1 ciclo	1 ciclo
28 Abril	1 ciclo	1 ciclo	1 ciclo	1 ciclo
5 Maio	1 ciclo	1 ciclo	1 ciclo	1 ciclo
11 Maio		1 ciclo		1 ciclo

Tabela 17 - Temperatura e Humidade Relativa no laboratório durante período de ensaios

Temperatura média	Temperatura mínima	Temperatura máxima	HR média	HR mínima	HR máxima
22,1°C	19,7°C	24,6°C	49,1%	22,2%	60,5%

### 4.3. RESULTADOS OBTIDOS

Para todos os materiais, foram realizadas medições da emissividade, antes e após serem submersas em água.

#### 4.3.1. TIJOLO

Com o intuito de determinar quais as emissividades iniciais das amostras de tijolo em estudo, foram realizadas três medições para cada amostra. Na Tabela 18 estão apresentados os resultados obtidos. Foi também registada a massa inicial antes da humidificação de cada amostra, assim como a massa após humidificação e após a secagem. As amostras apresentam uma massa semelhante entre elas e a emissividade a variar entre os 0,87 e os 0,90, resultando numa média de 0,884.

Tabela 18 - Emissividade e massa das amostras de tijolo

Amostras	Massa antes da humidificação	$\epsilon$	$\epsilon$	$\epsilon$	$\epsilon_{\text{média}}$	Massa após humidificação	Massa após secagem
1	2865,7	0,87	0,89	0,89	0,883	3295,7	2865,7
2	2853,9	0,88	0,89	0,89	0,887	3303,5	2854,9
3	2879,7	0,89	0,87	0,89	0,883	3329,9	2880,5
4	2840,1	0,88	0,88	0,88	0,880	3188,0	2840,5
5	2841,5	0,89	0,88	0,90	0,890	3273,1	2842,6
6	2834,0	0,88	0,87	0,89	0,880	3223,2	2834,7
7	2867,6	0,88	0,89	0,89	0,887	3319,7	2867,9
8	2889,4	0,89	0,88	0,89	0,887	3348,9	2888,8
9	2911,3	0,88	0,88	0,89	0,883	3365,3	2912,4
10	2879,8	0,88	0,88	0,89	0,883	3308,9	2880,9
<b>0,884</b>							

A Figura 29 mostra a evolução da emissividade ao longo da secagem do tijolo, onde se pode observar que nas primeiras 29 horas de secagem a emissividade, em todas as amostras, tem valores muito elevados. Entre as 29 horas e as 266 horas seguintes, respetivamente, entre o segundo e o décimo primeiro dia, é quando ocorre uma grande descida da emissividade, atingindo no décimo primeiro dia valores próximos dos esperados, isto é, próximos dos valores medidos inicialmente com as amostras secas. Nas medições seguintes existe uma pequena oscilação dos valores entre amostras, mas que no decorrer das horas de secagem tende a estabilizar.

Às 72 horas aparece um valor mais baixo que a maioria, mas foi analisado e corresponde igualmente ao valor mais baixo apresentado na hora 49,5 e na hora 97. Este facto pode ser devido a uma amostra em que a secagem teve uma evolução mais rápida, ou a alguma característica diferente. No entanto, no final atinge os valores esperados, semelhantes aos obtidos nas outras amostras.

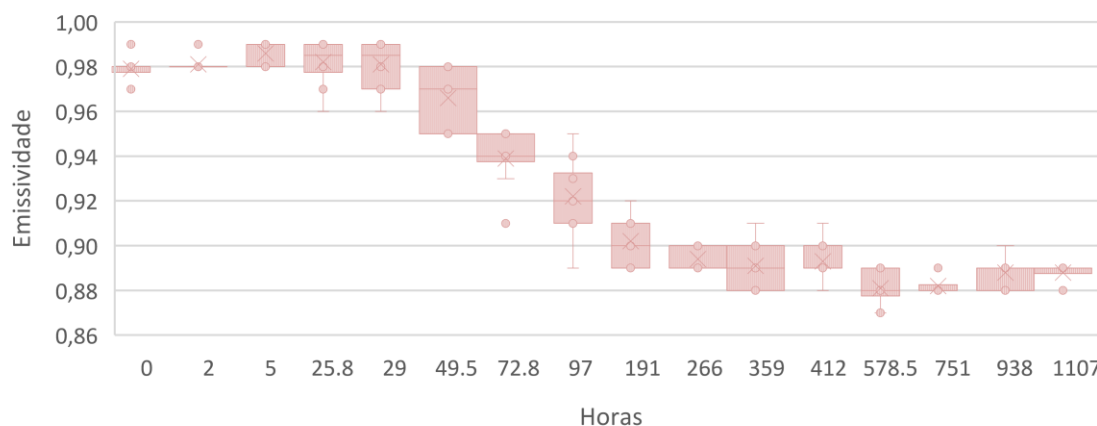


Figura 29 - Emissividade do tijolo em função das horas de secagem

Na Figura 30 é ilustrada a relação entre a massa das amostras e a respetiva emissividade. Foi possível ajustar uma linha de tendência a relacionar estas duas propriedades, através de uma função polinomial de grau 2, apresentada no gráfico da Figura 30. Podemos observar que quanto menor a massa da amostra, menor a respetiva emissividade e que esta característica é comum a todas as amostras. O  $R^2$ , coeficiente de determinação, tem um valor próximo da unidade, 0,9486, o que significa uma boa qualidade do ajuste obtido.

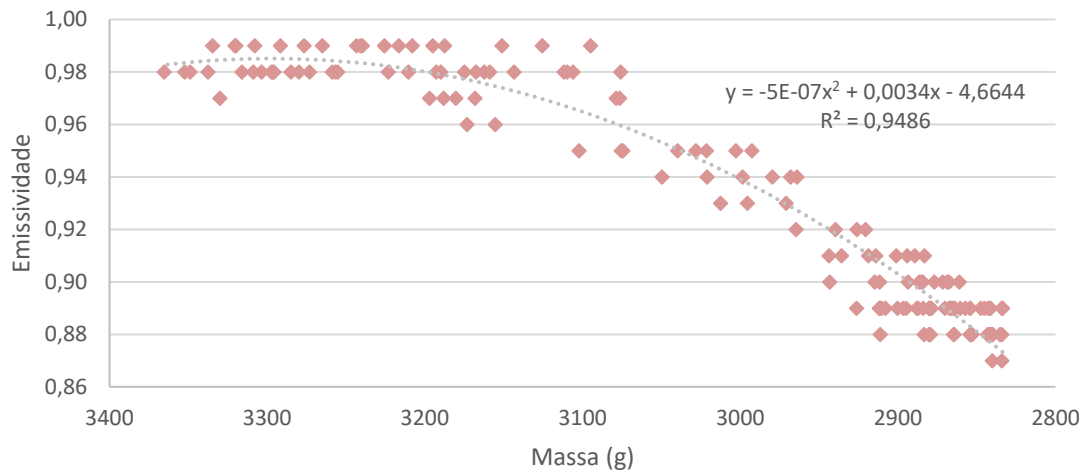


Figura 30 - Emissividade do tijolo em função da massa no decorrer da secagem

#### 4.3.2. BETÃO

Na Tabela 19 são apresentadas as características iniciais das dez amostras de betão. Pode-se observar semelhança na emissividade das amostras, variando entre valores de 0,89 e 0,92 e perfazendo um valor médio de 0,91. A massa das amostras de betão apresenta uma ligeira variação entre amostras.

Tabela 19 - Emissividade e massa das amostras de betão

Amostras	Massa antes da humidificação	$\epsilon$	$\epsilon$	$\epsilon$	$\epsilon_{\text{média}}$	Massa após humidificação	Massa após secagem
1	3857,00	0,91	0,90	0,90	0,90	3999,8	3910,9
2	3864,60	0,92	0,90	0,90	0,91	4012,5	3919,6
3	4011,70	0,92	0,92	0,91	0,92	4094,7	4061,6
4	3724,90	0,91	0,91	0,92	0,91	3806,8	3774,0
5	3839,30	0,90	0,89	0,89	0,89	3990,1	3893,7
6	3889,00	0,90	0,90	0,91	0,90	4035,8	3943,5
7	3975,20	0,91	0,90	0,90	0,90	4124,5	4033,9
8	3739,20	0,91	0,91	0,92	0,91	3878,9	3792,6
9	3910,40	0,92	0,91	0,92	0,92	4040,8	3947,1
10	3782,00	0,92	0,91	0,93	0,92	3914,8	3819,5
<b>0,91</b>							

A variação da emissividade do betão na fase de secagem é representada na Figura 31 onde se constata que na primeira medição todas as amostras começam com valores elevados, concentrados num intervalo entre 0,97 e 0,99. De seguida observa-se uma queda da emissividade nas primeiras horas de secagem, comum a todas as amostras, atingindo uma média de 0,92 passadas 146 horas do início da secagem. Quando decorridas 194 horas verifica-se um aumento da emissividade em 7 das 10 amostras, o que poderá ter ocorrido devido a fatores externos ou a algum erro de medição ou calibração. A partir desse instante é notório uma estabilização da emissividade. Nas primeiras horas de secagem são visíveis alguns valores ligeiramente abaixo da média, mas que no final todos estabilizam no mesmo intervalo de valores, indicando uma secagem menos morosa nos momentos iniciais das amostras correspondentes.

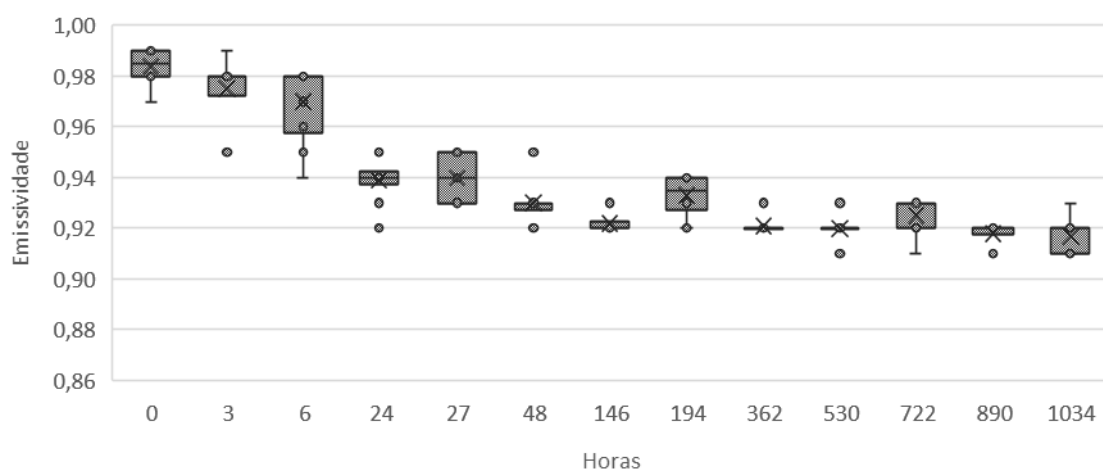


Figura 31 - Emissividade do betão em função das horas de secagem



Na Figura 32 é apresentado um gráfico de dispersão, que ilustra a relação entre a massa de cada amostra e a respetiva emissividade. No entanto, não é identificada nenhuma relação funcional entre estas duas propriedades no betão.

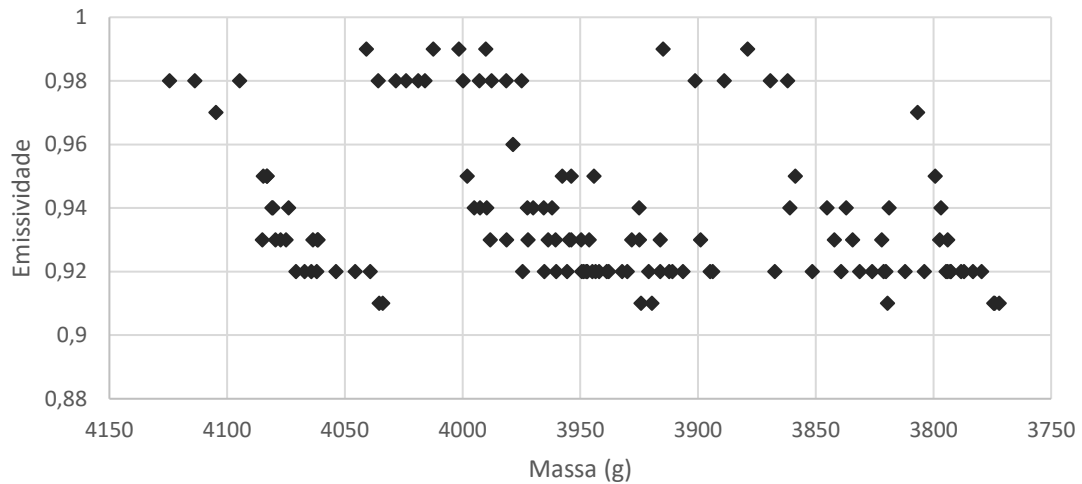


Figura 32 - Emissividade do betão em função da massa no decorrer da secagem

#### 4.3.3. PEDRA

A massa e a emissividade inicial das amostras de pedra são apresentadas na Tabela 20, onde se pode observar valores de emissividade bastante semelhantes entre as 9 amostras, resultando numa média de 0,866. A massa apresenta ligeiras variações entre as amostras, mas não relevantes.

Tabela 20 - Emissividade e massa das amostras de pedra

Amostras	Massa antes da humidificação	$\epsilon$	$\epsilon$	$\epsilon$	$\epsilon_{\text{média}}$	Massa após humidificação	Massa após secagem
1	990,64	0,87	0,86	0,86	0,863	1063,96	989,61
2	957,78	0,86	0,87	0,86	0,863	1034,16	956,82
3	971,32	0,87	0,87	0,87	0,870	1046,18	970,20
4	977,60	0,86	0,86	0,86	0,860	1052,90	976,57
5	958,74	0,87	0,87	0,86	0,867	1031,05	958,18
6	990,00	0,86	0,87	0,86	0,863	1063,50	989,44
7	966,37	0,86	0,87	0,87	0,867	1039,47	965,75
8	982,12	0,87	0,87	0,86	0,867	1056,40	981,49
9	980,85	0,87	0,87	0,87	0,870	1055,58	980,21

**0,866**

Na Figura 33 observa-se uma emissividade elevada no instante inicial e que se mantém nas primeiras horas de secagem. Há depois uma grande descida e variação de resultados na medição efetuada passadas 48 horas do instante em que as amostras são retiradas da água. Após este instante verifica-se uma estabilização de resultados, quase constante nas medições seguintes, com os valores no intervalo entre 0,86 e 0,88.

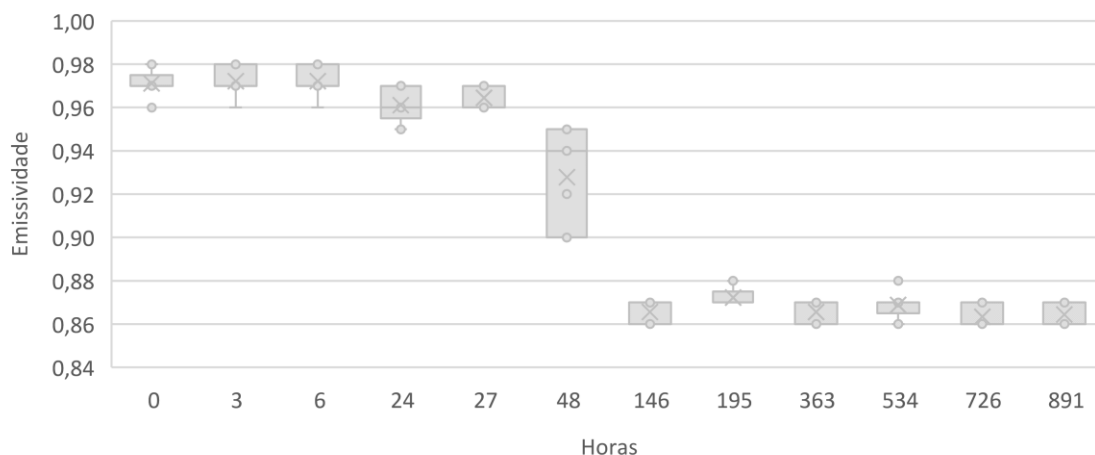


Figura 33 - Emissividade da pedra em função das horas de secagem

Na pedra, quando é relacionada a massa das amostras com a respetiva emissividade, é possível identificar uma linha de tendência polinomial de grau 2, apresentada no gráfico da Figura 34. Pode-se observar maiores valores de emissividade para maiores teores de humidade, isto é, maiores valores da massa das amostras. Quando comparadas as linhas de ajuste da pedra e do tijolo, verifica-se que a qualidade do ajuste do tijolo é bastante superior à da pedra, sendo o coeficiente de determinação do tijolo 0,9486 e da pedra de 0,7941.

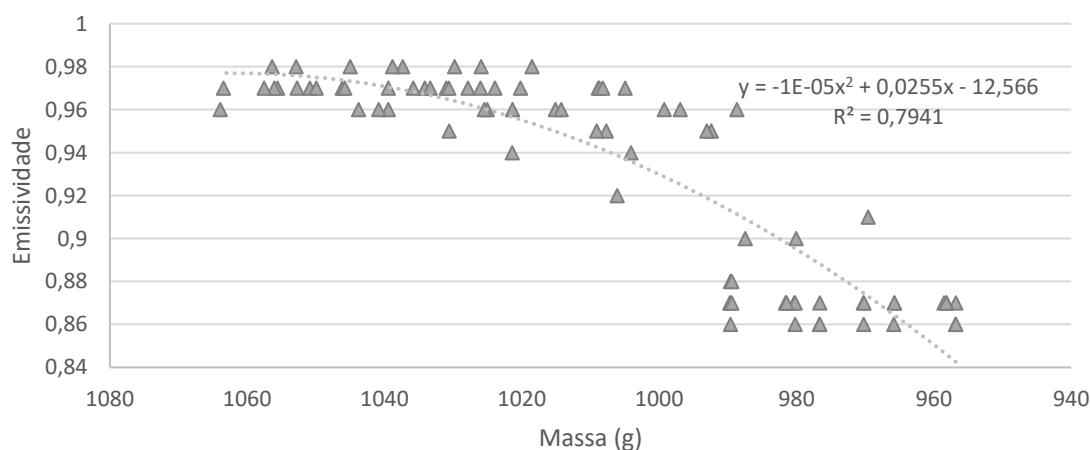


Figura 34 - Emissividade da pedra em função da massa no decorrer da secagem

## 4.3.4. MADEIRA

A madeira apresenta valores iniciais de emissividade e massa inicial bastante similares entre todas as amostras, sendo a emissividade média igual a 0,83, como é possível verificar na Tabela 21.

Tabela 21 - Emissividade e massa das amostras de madeira

Amostras	Massa antes da humidificação	$\varepsilon$	$\varepsilon$	$\varepsilon$	$\varepsilon_{\text{média}}$	Massa após humidificação	Massa após secagem
1	1087,85	0,82	0,83	0,83	0,83	2054,84	1227,96
2	1010,66	0,81	0,82	0,82	0,82	2074,02	1147,03
3	1054,18	0,81	0,82	0,83	0,82	2198,65	1203,00
4	1027,89	0,82	0,82	0,81	0,82	2050,03	1152,74
5	1048,96	0,82	0,83	0,82	0,82	2122,48	1193,54
6	1068,00	0,82	0,83	0,83	0,83	2060,00	1173,89
7	1068,19	0,82	0,83	0,83	0,83	2043,51	1196,30
8	1087,81	0,85	0,83	0,82	0,83	2004,50	1217,46
9	1106,36	0,83	0,83	0,82	0,83	2239,59	1236,91
10	1079,28	0,84	0,84	0,84	0,84	2192,90	1214,20

**0,83**

No acompanhamento da secagem das amostras de madeira, observa-se, inicialmente, que a emissividade, em todas as amostras, rondava a unidade. Este facto é devido à madeira ser um material com grande poder de absorção. Nas medições efetuadas nas horas seguintes, a emissividade, em algumas amostras, começa a apresentar variações de resultados, mas apenas a partir da medição das 23 horas, tal foi mais evidente. Na Figura 35 é possível visualizar um constante acompanhamento de todas as amostras na variação da emissividade, seguida de uma estabilização com média de aproximadamente 0,85. Nas últimas duas medições efetuadas obtiveram-se valores ligeiramente superiores à anterior.

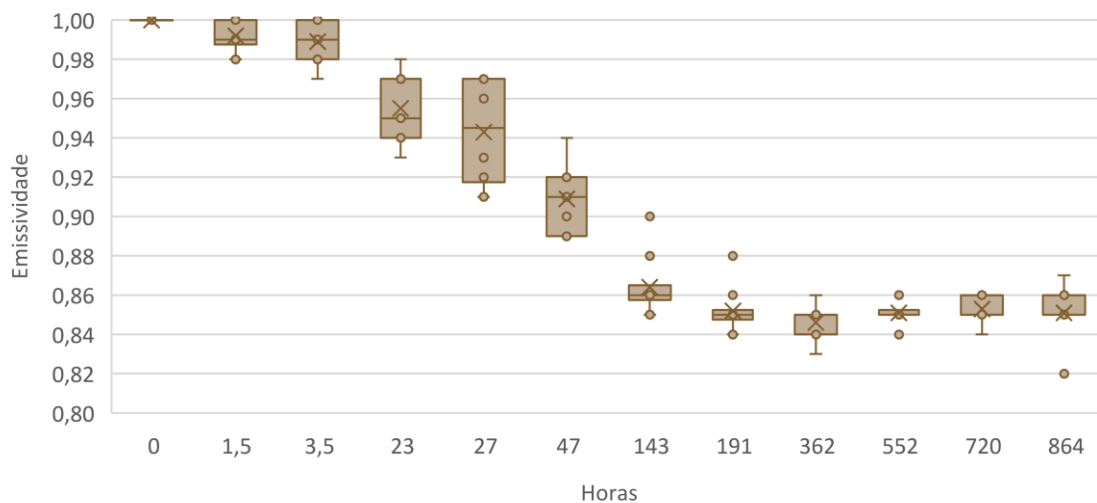


Figura 35 - Emissividade da madeira em função das horas de secagem

Na Figura 36 é ilustrada a relação entre a massa das amostras e a respetiva emissividade. É possível observar uma relação funcional do tipo polinómio de grau dois para representar essa relação. A emissividade diminui com a diminuição da massa, como nos casos anteriores, à exceção do betão que não se obteve qualquer relação entre as propriedades. A qualidade do ajuste da madeira é superior à qualidade do ajuste da pedra, mas inferior à do tijolo, com valor de coeficiente de determinação de 0,8649.

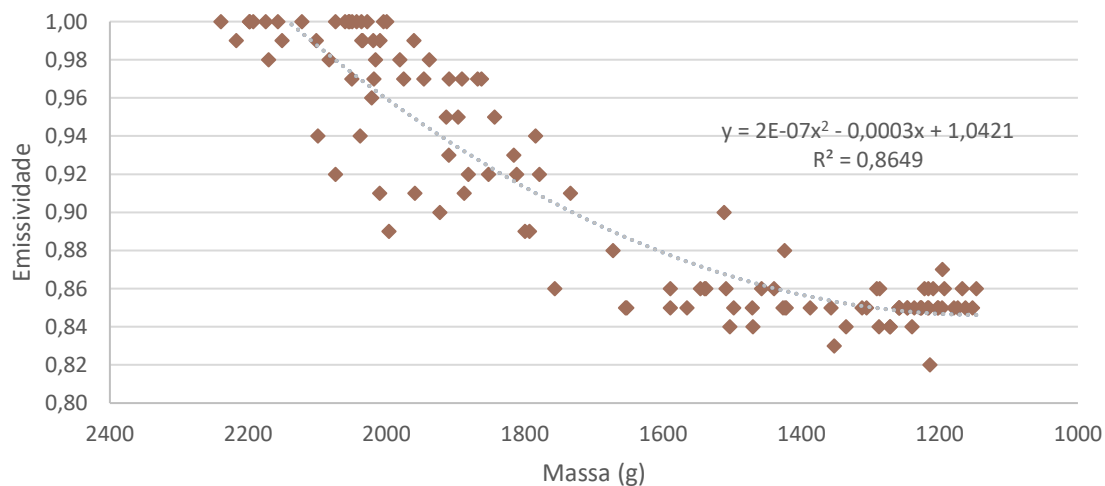


Figura 36 - Emissividade da madeira em função da massa no decorrer da secagem

#### 4.4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Numa análise geral, os resultados foram ao encontro do esperado, isto é, após a secagem, a emissividade estabilizou em todos os materiais em valores próximos dos medidos inicialmente com as amostras secas. Mas há alguns detalhes a destacar:

- O tijolo maciço utilizado apresentava algumas irregularidades na superfície exterior e eram também visíveis algumas manchas, variando de amostra para amostra, o que poderá ter condicionado alguns resultados pois o método utilizado mede a emissividade diretamente em contacto com a amostra e em vários pontos desta. A pedra, o betão e a madeira apresentavam boas condições exteriores e as amostras eram semelhantes entre elas.

- Quando foram submersas em água as amostras, a madeira foi o material que mais problemas causou. A contínua absorção de água e consequente aumento de peso obrigou a interromper o processo de humidificação antes de o critério de paragem ser verificado, por falta de tempo para a realização dos restantes ensaios de acompanhamento da secagem. A dificuldade em manter as amostras submersas em água devido à sua baixa densidade foi ultrapassada utilizando blocos de betão por cima destas. Os restantes materiais tiveram os comportamentos esperados, sendo que a pedra e o tijolo demoraram 5 e 6 dias, respetivamente, a estabilizar a massa, e o betão 13 dias.

- É comum em todos os materiais valores elevados da emissividade no instante inicial em que são retirados da água, devido à presença de água à superfície das amostras. Após a evaporação da mesma, a secagem das amostras começa a ser feita por difusão no interior do material atingindo a superfície apenas sob a forma de vapor e, a partir desse momento, os valores da emissividade começam a estabilizar.

- No tijolo, no betão e na madeira é possível verificar quando é estabilizada a emissividade, ocorrendo aos 11, 6 e 8 dias, respetivamente, após se retirarem as amostras da água. Na pedra verifica-se um intervalo de tempo em que há uma grande quebra e variação de valores da emissividade nas amostras. Este facto, merecia uma especial atenção e possivelmente um novo estudo para fragmentar aquele intervalo de tempo, com medições mais vastas. Verificou-se que a emissividade ao dia 6 já estava estabilizada, mas poderá ter ocorrido anteriormente.

- A madeira apresenta um valor de massa e emissividade final ligeiramente superior ao medido inicialmente (madeira seca), mas poderá ser justificado pelo facto da estabilização da massa das amostras não ter sido concluída. Este aspeto poderia ser alvo de um estudo mais aprofundado, pois a emissividade sofreu um ligeiro aumento nas últimas medições, o que também poderá, eventualmente, significar que a madeira criptoméria sofre alterações de características após submersa em água e posterior secagem.

- As massas finais após secagem no tijolo e na pedra atingem os valores da massa iniciais antes da humidificação, o que é um bom indicativo para confirmar que as amostras se encontravam totalmente secas. A madeira, como é referido no ponto anterior, não concluiu a secagem das amostras. E o betão, apesar de a variação de massa ter cumprido o critério para a paragem dos ensaios, apresenta uma massa final ligeiramente superior à inicial antes da humidificação.



# 5

## CONCLUSÃO

### 5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O trabalho realizado permitiu aprofundar o conhecimento sobre a emissividade, assim como sobre vários métodos de determinação da mesma.

Os ensaios laboratoriais permitiram o conhecimento e a utilização de vários equipamentos utilizados na medição desta propriedade, nomeadamente, o emissómetro, o termómetro pontual de infravermelhos e a câmara termográfica. Além da medição da emissividade para vários materiais de construção, também se analisou a influência da humidade na emissividade.

As conclusões retiradas do trabalho foram as seguintes:

- Entre os equipamentos testados o emissómetro é o mais preciso e com menos variação de resultados, quando analisadas várias amostras do mesmo material;
- Neste trabalho o termómetro pontual de infravermelhos revelou-se um equipamento pouco preciso na determinação da emissividade;
- A variação do ângulo de captação das imagens quando utilizada a câmara termográfica (de 90° para 45° face à superfície em estudo), não provocou alteração nos valores obtidos, como seria de esperar tendo em conta a informação disponível na literatura;
- Os resultados obtidos com o emissómetro e a câmara termográfica vão de encontro aos valores presentes na literatura;
- A presença de humidade influencia a emissividade dos materiais;
- Na análise efetuada verifica-se a existência de uma relação funcional, do tipo polinomial de 2º grau, entre a massa e a emissividade no tijolo, na pedra e na madeira;
- No betão não foi possível identificar a existência de qualquer relação entre a massa e a emissividade;
- Dos materiais estudados, o betão é o que tem maior emissividade;
- A presença de água à superfície dos materiais aumenta significativamente a emissividade dos mesmos.

## **5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Para futuros estudos sobre a emissividade de materiais de construção destaca-se:

- A comparação dos equipamentos de medição em outros materiais de construção;
- Realização de novos ensaios de emissividade ao longo da secagem da pedra de forma menos espaçada, para definir melhor a fase em que existe de fato influência do teor de humidade na emissividade;
- Determinação da emissividade para diferentes temperaturas e humidades relativas do ambiente, a fim de determinar a influência na emissividade dos materiais;
- Avaliação da emissividade com recurso à câmara termográfica de diferentes ângulos de captação de outros materiais de construção;
- Realização de ensaios na madeira cumprindo o critério de estabilização de massa.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. Albatici, A. Tonelli, *Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site*, Energy and Buildings, vol. 42(11), pp. 2177-2183, 2010.
- [2] R. Albatici, et. al, *Assessment of the thermal emissivity value of building materials using an infrared thermovision technique emissometer*, Energy and buildings, vol. 66, pp. 33-40, 2013.
- [3] N. Avdelidis, A. Moropoulou, *Emissivity considerations in building thermography*, Energy and Buildings, vol. 35 (7), 663-667, 2003.
- [4] F., Dewitt, D., Lavine, A., & Bergman, T. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer (6th ed)*. Canadá, John Wiley & Sons Inc, 2006.
- [5] Y. Çengel, *Heat Transfer: A practical Approach (2nd ed.)*. McGrall-Hill, Nova Iorque, Estados Unidos da América, 2003.
- [6] <http://www.bpihomeowner.org/blog/technically-speaking-principles-heat-transfer>. 09 Outubro 2017.
- [7] A. M. Rodrigues, A. Piedade e A. Braga, *Transmissão de calor por radiação, Técnica de Edifícios*, 158-165, Editores Orion, Amadora, 2009.
- [8] [http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com\\_content&task=view&id=248&Itemid=422](http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com_content&task=view&id=248&Itemid=422). 09 Outubro 2017.
- [9] E. Barreira, *Aplicação da Termografia ao Estudo do Comportamento Higrotérmico dos Edifícios*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2004.
- [10] C. Long, N. Sayma, *Heat Transfer*. Ventus Publishing ApS, 2009.
- [11] [http://chracustica.zip.net/arch2008-08-24\\_2008-08-30.html](http://chracustica.zip.net/arch2008-08-24_2008-08-30.html). 06 Novembro 2017.
- [12] C. Ciocia, S. Marinetti, *Ins-itu emissivity measurement of construction materials*. QIRT2012 - 11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, 11-14 Junho 2012, 1-7, Nápoles.
- [13] E. Barreira, E. Bauer, N. Mustelier, V.P. Freitas, *Measurement of materials emissivity – Influence of the procedure*, 2015.
- [14] R. Usamentiaga, P. Venegas, J. Guerediaga, L. Vega, J. Molleda and F. G. Bulnes, *Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing*, 2014.
- [15] A. Muscio, et al, *Robotic implementation of the slide method for measurement of the thermal emissivity of building elements*, in Energy and buildings, vol. 114, 241-246, 2016.
- [16] ASTM International, C1371 – 97, (04.06) - *Standart Test Methods for Determination of Emittance Materials Near Room Temperatura Using Portable Emissometers*. American Society for Testing and Materials, 1997.
- [17] BS EN 15976:2011 Flexible sheets for waterproofing - determination of emissivity, 2011.
- [18] A. Moropoulou, et al, *Calculating the emissivity of building materials for infrared thermographic applications*, 6th Conference of the Slovenian Society of NDT, Slovenia, 2001.
- [19] JIS A 1423:1983 Simplified test method for emissivity by infrared radio meter, 1983.
- [20] E1933 - 99a Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers, 2010.
- [21] T. C. Silva, M. V. Costa Sá, E. P. da Silva and F. C. da Silva, *Emissivity Measurements on Shape Memory Alloys*, 2016.
- [22] P. Skubisz, P. Micek, *Determination of Emissivity Characteristics for Controlled Cooling of Nickel-alloy Forgings*, Poland, 2014.
- [23] M. O’Grady, A. A. Lechowska, A. M. Harte, *Infrared thermography technique as an in-situ method of assessing heat loss through thermal bridging*, Energy and Buildingm ,135:20-32, 2017.
- [24] NEC SAN-EI INSTRUMENTS, LTD. *TH1 Thermo-Tracer- Operation Manual*, 1991.

- [25] OMEGA ENGINEERING INC. *Transactions in Measurement & Control – Volume I – Non contact temperature measurement*. Putman Publishing Company and OMEGA Press LLC, 1998.
- [26] [http://x26.com/irpaper\\_emissivity.htm](http://x26.com/irpaper_emissivity.htm), 04 Dezembro 2017.
- [27] ISO 12570, Hygrothermal performance of building materials and products – determination of moisture content by drying at elevated temperature.
- [28] M. K. Kumaran, *Heat, Air and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts*, International Energy Agency.
- [29] A. P. Santos e L. Matias, *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios*. ITE50, Lisboa, Portugal: LNEC, 2007.
- [30] [http://www.contemp.com.br/downloads/pdf/Tabela\\_de\\_Emissividades.pdf](http://www.contemp.com.br/downloads/pdf/Tabela_de_Emissividades.pdf), 16 Outubro 2017.
- [31] Thermo Tracer TH9100 – Operation Manual
- [32] Pyrometer IE7 – Technical Information and Data Sheet
- [33] Devices & Services Co. Manual do Emissómetro Model AE. Texas, Estados Unidos da América.
- [34] D. Montgomery, G. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers*, Estados Unidos da América: John Wiley & Sons, Inc, 2003.
- [35] J. M. HART, *A practical guide to infra-red thermography for building surveys*. Garston, Watford, BRE, 1991.

**ANEXO I**  
**FICHA TÉCNICA - CRIPTOMÉRIA JAPONICA**  
**LNEC**



**Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I. P.****Departamento de Edifícios**Núcleo de Revestimentos e Isolamentos  
Laboratório de Ensaios de Plásticos Celulares

Boletim nº 98/11- LNEC/LEPC

Pág. 2/3

Pedido nº 46/11

Visto

  
**A. Baptista Coelho**  
Chefe do NAU

A amostra submetida a ensaio consistia de seis secções (tábuas) de madeira de *Criptoméria japónica*, com dimensões faciais nominais de 300 mm x 300 mm, entregues para ensaio pela entidade requisitante.

As secções de tábuas de madeira eram constituídas por sarrafos colados, com secção transversal nominal de 39 mm x 25 mm. Em relação às faces principais dos provetes, os sarrafos estavam orientados, predominantemente, no sentido radial da madeira.

Foram submetidos a ensaio de determinação da condutibilidade térmica três das seis secções de madeira, com dimensões faciais nominais indicadas em 1.

**3 — RESULTADOS DOS ENSAIOS**

As espessuras de ensaio e os resultados dos ensaios são apresentados no quadro 1.

**Quadro 1** — Valores individuais e médios obtidos nos ensaios de determinação da condutibilidade térmica de provetes de madeira de *Criptoméria japónica*

Amostra	Provete	Características dos provetes			Condições de ensaio					Resultados dos ensaios
		Espessura de ensaio (mm)	Massa volumica aparente após condic. (kg/m <sup>3</sup> )	Tor de água de equilíbrio (a) (kg/kg)	Direcção e sentido do fluxo	Temp <sup>a</sup> média (°C)	Queda de temp <sup>a</sup> (°C)	Densidade de fluxo de calor (W/m <sup>2</sup> )	Variação relativa de massa durante o ensaio (kg/kg)	Condutibilidade térmica (W/m. °C)
46/11-1	A1	24,9	284,8	0,075	Vertical, ascendente	10,3	15,0	45,0	0,003	0,0744
	B1	24,9	286,3	0,076		10,2	15,0	46,4	0,002	0,0769
	C1	24,9	292,0	0,075		10,1	15,0	43,8	0,002	0,0727
Média	—	—	287	—	—	10,2	—	—	—	0,0747

\* - Correspondente à massa dos provetes após condicionamento em ambiente 23/50



## **ANEXO II**

### **FICHA TÉCNICA - PEDRA ANÇÃ**





<i>Massa volúmica - <math>\rho</math> (*)</i>		2155 $\pm$ 14 kg/m <sup>3</sup>	
<i>Calor específico - <math>c</math></i>		1000 J/kg.K	
<i>Porosidade - <math>\varepsilon</math> (*)</i>		19,7 %	
<i>Condutibilidade térmica - <math>\lambda</math> (*)</i>		1,33 $\pm$ 0,0250 W/m.K	
<i>Factor de resistência à difusão de vapor <math>\mu</math> (*)</i>		<i>MTS</i>	41 $\pm$ 2,22
		<i>MTH</i>	29 $\pm$ 3,11
<i>Curvas higroscópicas (*)</i>	<i>HR (%)</i>	<i>Adsor</i>	<i>Desador</i>
		<i>w (kg/m<sup>3</sup>)</i>	
	4	0,5214	0,9514
	11,2	0,5925	1,1498
	34,8	0,8725	1,2388
	58,6	1,0427	1,6280
	76,3	1,2366	2,3597
	80,0	1,3336	
	84,2	1,5835	
	92,1	2,3809	4,1435
<i>Coeficiente de transporte líquido <math>D_w</math> (*)</i>		<i>w</i>	<i>D<sub>w</sub></i>
	<i>w<sub>26</sub></i>	1,70 kg/m <sup>3</sup>	6,6x10 <sup>-11</sup> m <sup>2</sup> /s
	<i>w<sub>sat</sub></i>	188 kg/m <sup>3</sup>	6,2x10 <sup>-8</sup> m <sup>2</sup> /s
<i>Coeficiente de absorção - <math>A</math> (*)</i>		0,024 $\pm$ 0,0022 kg/m <sup>2</sup> . $\sqrt{s}$	
<i>Teor de humidade de saturação - <math>w_{sat}</math> (*)</i>		188 $\pm$ 1,76 kg/m <sup>3</sup>	

